

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

**Návrh a konstrukce řízení bezpilotního prostředku pro měření
parametrů přízemní vrstvy atmosféry**

**Proposal and Control Design of an UAV for Measuring
Parameters of the Atmosphere Ground Layer**

Student:

Jan Bojko

Vedoucí Bakalářské Práce:

Ing. František Martinec, CSc.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student:

Jan Bojko

Studijní program:

B3712 Technologie letecké dopravy

Studijní obor:

3708R037 Technologie provozu letecké techniky

Téma:

Návrh a konstrukce řízení bezpilotního prostředku pro měření parametrů
přízemní vrstvy atmosféry
Proposal and Controll Design of an UAV for Measuring Parameters of
the Atmosphere Ground Layer

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu řešení problému
2. Výběr možností řízení bezpilotního prostředku
3. Návrh řízení bezpilotního prostředku
4. Výběr snímačů pro řízení bezpilotního prostředku
5. Návrh programového vybavení pro elektrické systémy bezpilotního prostředku
6. Částečná realizace řízení, snímačů a programového vybavení bezpilotního prostředku

Seznam doporučené odborné literatury:

Volner, R.: Digitální technologie – Elektronické přístrojové systémy, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007.

Blažek, J.: Úvod do problematiky technických systémů automatického řízení a regulace, Košice 1983

http://cs.wikipedia.org/wiki/Bezpilotní_letoun

Musial M.: System Architecture of Small Autonomous Java, (Paperback), VDM Verlag Dr. Mueller e. K., 2008

<http://cs.wikipedia.org/wiki/MEMS>

http://www.st.com/web/catalog/sense_power/FM89

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Martinec, CSc.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jan Bojko

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Návsí 578, 73992, Česká Republika

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu projektu Doc. Ing. Petr Jančík Ph.D. Za možnost podílet se na tomto prestižním projektu a být jeho součástí. Dále vedoucímu práce Ing. Františkovi Martincovi, Csc. Za podnětné a trpělivé vedení. V neposlední řadě bych rád poděkoval Českému hydrometeorologickému ústavu za možnost kalibrace meteorologických snímačů a ochotu s námi spolupracovat. Nakonec bych chtěl poděkovat i svému týmu Kristýně Lešenarové, Aleši Stuchlíkovi a Tomáši Zavackému, kteří dokázali vždy řešit problémy zdánlivě i neřešitelné.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BOJKO, J. *Návrh a konstrukce řízení bezpilotního prostředku pro měření parametrů přízemní vrstvy atmosféry*: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut Dopravy, 2014, 41 s. Vedoucí práce: Ing. František Martinec, CSc.

Bakalářská práce se zabývá návrhem, sestavením a zabudováním elektronických komponentů do bezpilotního letounu, včetně jeho řízení a procesu snímání znečištění ovzduší. Na základě konkrétních specifikací bezpilotního letounu, které jsou popsány na začátku práce, je navrženo řízení, které musí být intuitivní, a zároveň vhodné pro snímání ovzduší i bez vizuálních podmínek. Dalším krokem je návrh systému snímání a jeho kalibrace. Výsledná data je nutno přenášet na zem v reálném čase a zobrazovat je na zobrazovací jednotce. Důraz je kladen na to, vytvořit pro okolí zcela bezpečný bezpilotní letoun s viditelným osvětlením, schopný minimálně půlhodinového letu.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BOJKO, J. *Proposal and controll Design of an UAV for Measuring Parameters of the Atmosphere Ground Layer*: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2014, 61 p. Thesis head: Ing. František Martinec, CSc.

Bachelor thesis is dealing of design, construct and installation electronic component to the unmanned aerial vehicle included control and the process of measuring air pollution. Based on the specific specifications of the UAV, which are described in the beginning of thesis. It is designed to control UAV which must be intuitive and also suitable for sensing air without visual conditions. The next step is design sensing system and his calibration. The resulting data must be transmitted to the ground in real time and displayed on the screen. Emphasis is placed create a completely safe unmanned aircraft with visible light for the surrounding environment.

Obsah

1. Úvod	12
Cíl.....	13
Spolupráce.....	13
2. Vlastnosti a pohyb bezpilotního letounu.....	14
2.1 Základní specifikace bezpilotního letounu.....	14
2.2 Mechanika letu	15
2.2.1 Pohyb kolem podélné osy, klonění.....	17
2.2.2 Pohyb kolem bočné osy, stoupání.....	17
2.2.3 Pohyb kolem svislé osy, vybočení	18
2.3 Návrh řízení pro bezpilotní letoun	19
2.3.1 Výchyly řídicích ploch a jejich omezení	20
2.3.2 Schéma návrhu řízení a řídicích ploch	21
2.3.3 Výpočet krouticího momentu pro návrh servomotoru	21
2.3.4 Použité servomotory na bezpilotním prostředku	22
2.4 Servomotory pro řízení bezpilotního letounu v souřadnicovém systému	22
2.4.1 Popis akčních členů	23
3. Technologie řízení bezpilotního letounu	24
3.1 Pozemní řízení bezpilotního letounu.....	24
3.1.1 Analýza možností řešení	24
3.1.2 Ergonomie vysílací soustavy	25
3.1.3 Komunikace mezi vysílací soustavou a letounem	25
3.2 Systém vzdáleného řízení bezpilotního letounu.....	26
3.2.1 Analýza možností řešení	26
3.2.2 Autopilot APM 2.6	26
3.2.3 Princip a funkčnost.....	27
3.3 Navigační systém bezpilotního letounu	29
3.3.1 Trať k navigačnímu bodu	30
3.3.2 Zaměření navigačního bodu	30
3.3.3 Průlet cílovými body.....	30
3.4 Výběr snímačů pro řízení bezpilotního letounu	31
3.4.1 Snímač orientace v prostoru.....	32
3.4.2 Snímač zrychlení v prostoru	32
3.4.3 Snímač polohy v prostoru	33
3.4.4 Snímač rychlosti proudění vzduchu	33
3.4.5 Optický snímač otáček motoru	34

3.4.6 Měření úrovně napětí a snímání teploty motoru	34
3.5 Bezpečnostní prvky bezpilotního letounu	34
4. Řízení systému snímání znečištění ovzduší a jeho částečná realizace.....	36
4.1 Analýza současného stavu řízení meteorologických snímačů	36
4.2 Řídicí systém Arduino.....	37
4.2.1 Zpracování naměřených dat	38
4.3 Částečné programování řídicího systému Arduino	38
4.3.1 Algoritmus řízení meteorologických snímačů	39
4.2 Snímač prachu	41
4.4 Snímač teploty a vlhkosti	42
4.5 Snímač oxidu uhelnatého (CO)	44
4.6 Kalibrace meteorologických snímačů	44
4.6.1 Kalibrace č. 1 Ostrava Přívoz	44
4.6.2 Kalibrace č. 2, Ostrava Poruba	45
5. Systém osvětlení bezpilotního letounu	46
5.1 Led diody pro osvětlení UAV	46
5.2 Dálkové ovládání osvětlení	47
5.3 Řídicí systém Atmel	47
5.4 Programování řídicího systému Atmel.....	48
5.4.1 Algoritmus návrhu řízení osvětlení letounu	48
6. Napájení elektrické sítě bezpilotního letounu	49
6.1 Zdroj napájení elektrické sítě v letounu	49
6.2 Stabilizace napětí	49
6.3 Napájecí desky pro rozvod elektrické energie	50
7. Navržené řízení bezpilotního letounu a snímacího zařízení.....	51
7.2 Dosáhnutí cílů	54
7.3 Využití projektu	54
7.4 Další vývoj projektu	54
Závěr	55
Použitá literatura	56
Přílohy	58

Zkratka	Anglická fráze	Česká fráze
AMR	Anisotropic Magnetoresistive	Anisotropic Magnetoresistive
APM	Ardupilot mega	Ardupilot mega (autopilot)
AUX	Auxiliary Port	Pomocný port
CO	Carbon monoxide	Oxid uhelnatý
ČHMI	Czech Hydrometeorological Institute	Česky hydrometeorologický institut
ČHMÚ	Czech Hydrometeorological Institute	Česky hydrometeorologický ústav
D2	Digital pin 2	Digital pin 2
DCM	Direction cosine matrix	Direction cosine matrix
DSS	Direct sequence spectrum	Přímé sekvenční spektrum
FET	Field Effect Transistor	Field Effect Transistor
FH	Frequency hopping	Kmitočtové skoky
FTDI	Future Technology Devices International	Future Technology Devices International
GIS	Geological information service	Geologický informační servis
GND	Ground	Zem
GPS	Global position navigation	Polohovací systém
I ² C	Inter-Integrated Circuit	Multi-másterová sběrnice
IAS	Indicate Air speed	Indikovaná rychlost
IMU	Internal measure unit	Vnitřní měřicí zařízení
IR	Infra-red	Infračervený
LED	Light emitting diode	Dioda emitující světlo
Li-Pol	Lithium polymer battery	Lithium-polymerový akumulátor
Log	Logical	Logická
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems	Mikro-mechanické prvky
MG	Metal Gear	Ocelové převody
MUX	Multiplexer	Multiplexor
N/U	Not used	Nevyužito
Obr	Picture	Obrázek
PC	personal computer	Osobní počítač
PCB	Printed Circuit Board	Deska plošných spojů
PID	Proportional-Integral-Derivative	Proporcionální, Integrační a Derivační složka

PJ	Power unit	Pohonná jednotka
PM	Power module	Napájecí modul
PM10	Particulate matter the size of 10 um	Poletavý prach o velikosti 10um
RAM	Random-access memory	Paměť s přímým přístupem
RC	Remote control	Dálkově ovládaný
RPM	Revolutions per minute	Otáčky za minutu
Rx	Received	Přijímač
ŘJ	Control unit	Řídicí jednotka
SCK	Serial clock	Hodinový signál
SD	Secure Digital	Secure Digital
Sn	Sensor	Snímač
SPI	Serial peripheral interface	Sériové rozhraní
SUAV	Small Unamend air vehicle	Malý bezpilotní letoun
Sv	World war	Světová válka
Tan	Tangent	Tangens
TTL	Transistor-transistor-logic	Tranzistorově-tranzistorová logika
TV	Television	Televize
Tx	Transmit	Vysílač
Tzv	The so-called	Tak zvaný
UAV	Unamend air vehicle	Bezpilotní letoun
UBEC	Universal Battery Elimination Circuit	Spínaný stabilizátor
USB	Universal serial bus	Univerzální sériová sběrnice
Vcc	Power supply pin	Napájecí pin
Wi-Fi	wireless fidelity	Bezdrátová věrnost

1. Úvod

Létání je dimenzí života, o které snili tisíce lidí, no ne všem se jejich sen dokázal naplnit. Už před tisíci lety, kdy se v řeckých bájích psalo o Ikarovi a Daidalovi, lidé záviděli ptákům a toužili spatřit svět z jiné perspektivy. Tato touha se stala skutečností až roku 1783, kdy bratři Mongolfierové poprvé vzlétli pomocí balónu a spatřili zem z ptačí perspektivy. O pravém létání, ale můžeme mluvit, až od roku 1903, kdy bratři Wrightové uskutečnili svůj první let, poprvé uchytili do ruky knípl a ucítili na vlastní kůži, že vzduch není jen průhledné nic, ale úžasná živá hmota, o kterou se můžete opřít.

Technický vývoj spěje dál a v 21. století myšlenka zdokonalit letouny zachvátila celý svět natolik, že jediným slabým článkem letounu se stal jeho pilot. Tento a spousta dalších faktorů zapříčinily vznik bezpilotních letounů. Jejich využití s moderní technologií je opravdu všestranné, nacházejí uplatnění v armádě, komerční ale i ve vědecké sféře. Pokrok je enormní a jedinou překážkou je, že legislativa nestíhá aktualizovat zákony daného státu o bezpilotních letounech.

Myšlenka navrhnout a vytvořit bezpilotní letoun, jenž bude bezpečný pro okolní prostředí a jehož primárním úkolem bude měřit znečištění ovzduší, spatřila světlo světa na jaře roku 2013. Tedy hned po sezóně, ve které limity znečištění ovzduší byly překračovány téměř každý den. Jedním z úkonů bylo navrhnout, sestavit a naprogramovat kompletní elektroniku a řízení bezpilotního letounu vyjma bezdrátového přenosu dat, čímž se dále zaobírá tato práce.

V první části dokumentu jsou shrnuta základní specifika letounu, mechanika letu a jeho návrh řízení. Dále je zde popsán návrh a principiální hledisko ovládání bezpilotního letounu.

V druhé části dokumentu je popsáno řízení řídících systémů pro meteorologické snímače a jejich úprava, jelikož snímače byly původně stavěny pro statické využití. Dále je zde uvedeno řízení osvětlení letounu a realizace elektrické sítě pro napájení jednotlivých komponentů v bezpilotním letounu.

Podstatné části tohoto projektu tvoří práce dalších členů týmu, které jsou zde zmíněny, avšak podrobně se jimi zabírají další bakalářské práce.

Cíl

Cílem této bakalářské práce je řízení a stabilizace bezpilotního letounu, a to autonomně nebo manuálně tak, aby byl zcela bezpečný pro okolí a schopný minimálně půlhodinového letu. Bezpečnost letounu by měla být zajištěna mimo jiné i dostatečně viditelným osvětlením. Součástí této práce je i funkčnost a řízení snímačů letových veličin i kvality ovzduší, dále také zálohování dat v letounu a jejich zobrazení na zemi k dalšímu vyhodnocení.

Spolupráce

Za úkolem realizace tohoto projektu byl vytvořen tým dobrovolníků, jejichž znalosti dominují právě v určité oblasti. Kristýna Lešenarová, konstruktérka, jejím primárním úkolem bylo vytvořit tento bezpilotní letoun a přenést tak návrh v podobě papíru do reálné podoby. Aleš Stuchlík, technik a strojař, měl za úkol navrhnout a zakomponovat pohonný systém a vyvinout bezdrátový přenos dat z letounu na zem. Tomáš Zavacký, jehož úkolem bylo vyhodnocovat měření naměřená bezpilotním letounem a snažit se prosadit tento letoun na úřadě civilního letectví v Praze.

2. Vlastnosti a pohyb bezpilotního letounu

Letounu je navržen konstruktérkou tak, aby byl v různých fázích letu vždy stabilní a měl relativně malou pádovou rychlost. Konstrukce je tvořena z balzy, topolových překližek a duralu, tyto použité materiály zajišťují odolnost vůči silám, které budou na letoun působit, a zároveň zaručují relativně nízkou hmotnost.

Bezpilotní letoun neboli také UAV (obr. 2.1) disponuje říditelnou podvozkovou nohou, která mu poskytuje větší obratnost na povrchu. Tlačná koncepce pohonného systému, jehož pohonnou jednotkou je metylalkoholový motor, dokáže vyvinout potřebný tah a umožňuje letounu být minimálně 45 minut ve vzduchu. Jelikož se jedná o velkou plochu, UAV nemá velkou odolnost vůči bočnímu větru.



Obr.2.1:Bezpilotní letoun ve vzduchu.

2.1 Základní specifikace bezpilotního letounu

Konstrukce

Typ	Dvoutrupý
Podvozek	Přídový
Rozpětí křídel	3,00 m
Plocha křídel	1,14 m ²
Výška	0,62 m
Délka	1,80 m
Prázdná hmotnost	5,2 kg
Maximální vzletová hmotnost	8,0 kg

Tabulka 1: Konstrukční specifikace

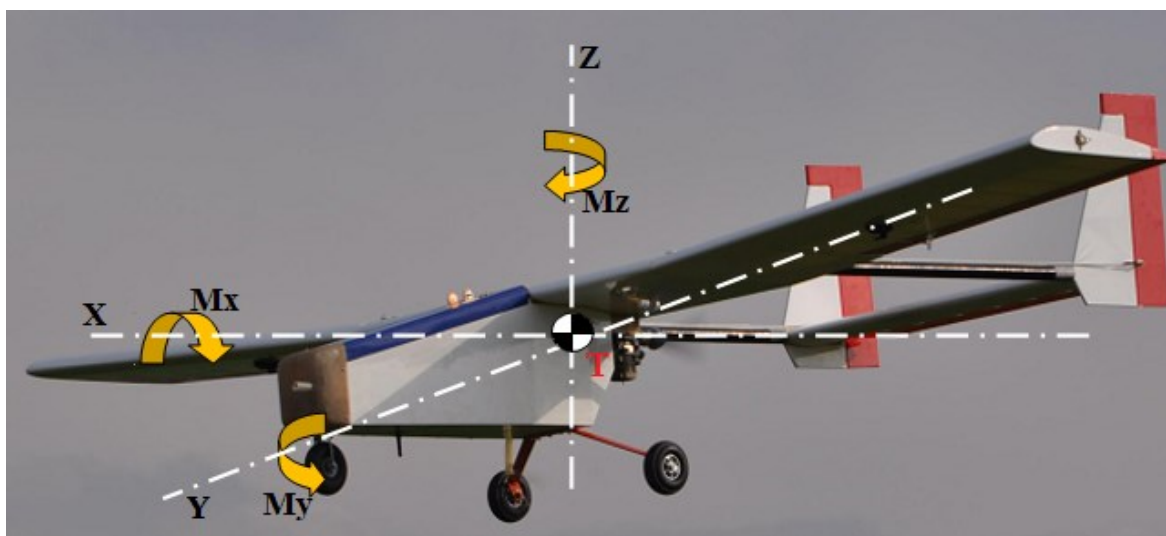
Pohonný systém a jeho výkonnost

Typ	Metylalkoholový
Objem	14,95 ccm
Válce/ventily	1
Výkon	2,1 kw
Rozsah otáček	2 000 - 15 000 ot/min
Spotřeba	900 ml/hod
Vrtule	Dvoulistá tlačná
Maximální rychlost	100 km/h
Pádová rychlost	20 km/h
Vzletová rychlost	35 km/h

Tabulka 2: Výkonnostní specifikace

2.2 Mechanika letu

Je obor zabývající se zákonitostmi pohybu letounu včetně souřadnicového systému. Tento systém je určený k popisu pohybu tělesa a orientace v prostoru (obr. 2.2). Aby model mohl být bezpilotním letounem, musí být schopen pohybu kolem všech tří os. Referenčním bodem v případě letadlového souřadnicového systému bývá těžiště T . [1]



Obr. 2.2: Souřadnicový systém UAV

X - podélná osa, Y - bočná osa, Z - svislá osa, M_x - smysl pohybu kolem osy X , M_y - smysl pohybu kolem osy Y , M_z - smysl pohybu kolem osy Z , T - těžiště.

Souřadnicový systém se skládá ze tří os.: podélná osa X , bočná osa Y a kolmá osa Z . Otáčivý moment kolem těchto os zajišťují akční členy.

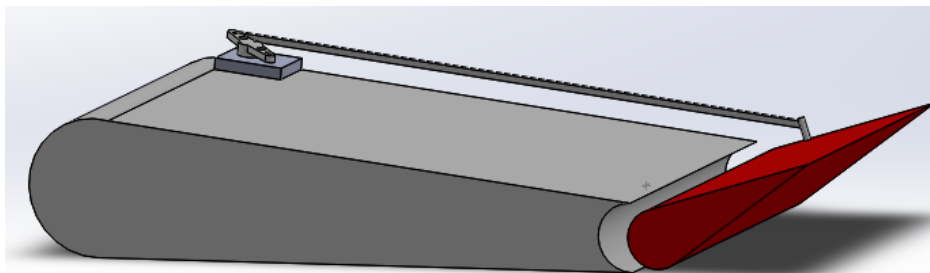
Podélná osa - Bezpilotní letoun provádí kolem podélné osy činnost, jejímž výstupem je náklon a následně zatočení o určitý úhel. K tomuto úkonu musí být využity křídélka umístěna na křídlech, jejichž výchylkou se změní obtékání křídel a je generován náklon. [1]

Bočná osa - Bezpilotní letoun provádí kolem bočné osy činnost, jejímž výstupem je klopení a následně stoupání do požadované výšky. K tomuto úkonu musí být využito výškové kormidlo umístěné na vodorovné ocasní ploše, které je možné vychýlit o určitý úhel. [1]

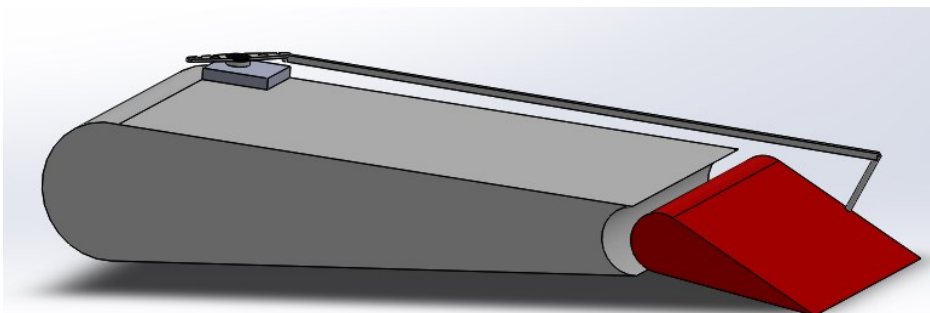
Kolmá osa - Bezpilotní letoun provádí kolem kolmé osy činnost, způsobující posuvný pohyb a následně vybočení o určitý úhel, někdy se tomuto jevu říká skluz. K tomuto úkonu se využívá směrového kormidla, nacházejícího se na svislé ocasní ploše, které je možné vychýlit o určitý úhel. [1]

Akční členy - Tyto akční členy se nazývají servomotory a jejich hlavním úkolem je převádět digitální signál na mechanický pohyb (viz. kapitola 2.4).

Vychýlením kormidel docílíme zvýšení vztlačové síly na křídle (obr. 2.3) nebo naopak k snížení (obr. 2.4). Zpravidla má křídélko větší výchylku nahoru než dolů. Jejich plocha a velikost vychýlení charakterizuje řiditelnost letounu kolem tří os.



Obr. 2.3: Zvýšení vztlačové síly (navrhnuto v programu Solid Wokrs)

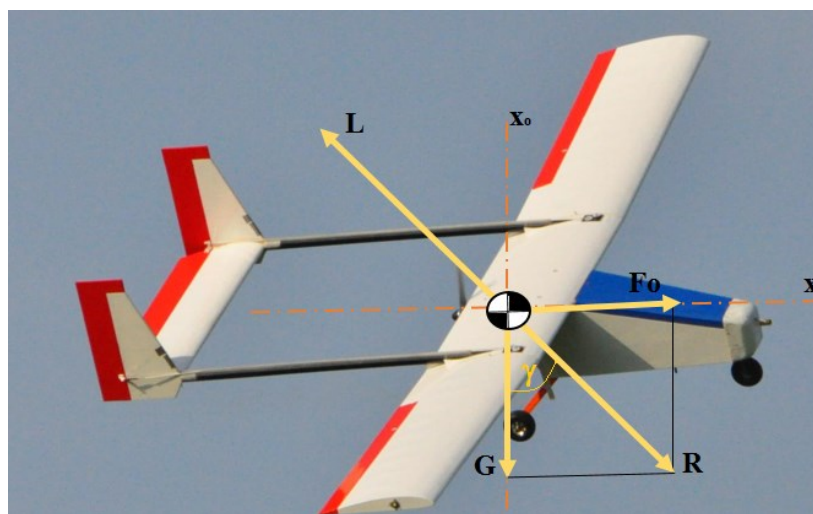


Obr. 2.4: Snížení vztlačové síly (navrhnuto v programu Solid Wokrs)

2.2.1 Pohyb kolem podélné osy, klonění

Pomocí pohybu kolem podélné osy je prováděno zatáčení, tedy let se změnou azimutu (obr. 2.5). Zatačky se dělí dle různých kritérií, například dělení dle způsobu pilotáže, a to na správnou a nesprávnou. Nesprávná zatačka se dělí dále ještě na skluzovou a výkluzovou zatačku. [1]

Aby letoun provedl správnou zatačku, musí dojít k naklonění letounu do směru zatáčení, přičemž síly působící na letoun budou v rovnováze (obr. 2.5). Pokud síly nebudou v rovnováze, letoun poletí vybočený a tedy v nesprávné zatačce. [1]



Obr. 2.5: Rovnováha sil ve správné zatačce

γ – úhel náklonu, X – podélná osa, X_0 – horizontální rovina, L – vzlaková síla, R – výsledná aerodynamická síla křídla, G – tíhové zrychlení

U zatáčení letounu se sledují zvláště tyto děje:

- Minimální rychlost v zatačce, kde vliv náklonu letounu zvyšuje minimální rychlost v zatačce.
- Potřebný tah a výkon v zatačce.
- Poloměr zatáčení, který je dán rychlostí a náklonem letounu.

2.2.2 Pohyb kolem bočné osy, stoupání

Charakterizuje let, při kterém bezpilotní letoun zvyšuje svoji výšku. Na obr. 2.6 je zobrazen letoun v režimu ustáleného stoupání. K ustálenému stoupání nemůže dojít, jelikož s rostoucí výškou dochází vlivem poklesu hustoty a tahu motoru k snížení vertikální

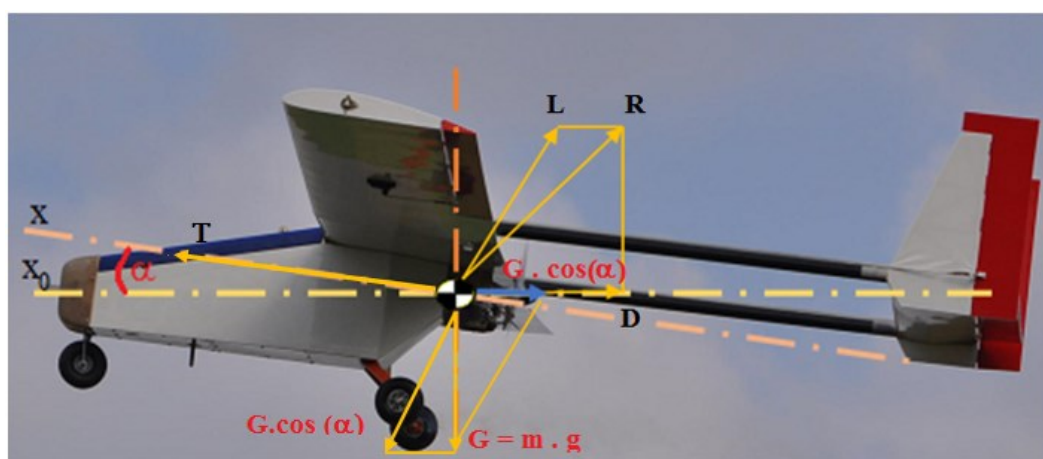
rychlosti. Z obr. 2.6 tedy vyplývá, že součet všech sil je ve stoupání nulový a jsou platné následující vztahy:[1]

$$T = D + G \cdot \sin \alpha$$

$$L = G \cdot \cos \alpha$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{T - D}{G} \right)$$

α – úhel náběhu, D – odpor generován pohybem letounu, G – tíhové zrychlení, T – tah, L – vztlaková síla,



Obr. 2.6: Rovnováha sil ve stoupání

α – úhel náběhu, X – podélná osa, X_0 – horizontální rovina, T – tah, L – vztlaková síla, D – odpor generovaný pohybem letounu, R – výsledná aerodynamická síla křídla

Úhel stoupání závisí na přebytku tahu a stoupavost na přebytku výkonu. U stoupavého letu se sledují zvláště tyto děje.

- Stoupavost je změna vertikální polohy letounu za jednotku času v průběhu stoupání.
- Gradient stoupání vyjadřuje změnu výšky v závislosti na ulétnuté vzdálenosti.
- Teoretický dostup je výška, ve které rychlost stoupání UAV je rovna nule a považuje se tak za absolutní dostup.

2.2.3 Pohyb kolem svislé osy, vybočení

Tento pohyb generuje úhel vybočení mezi horizontální osou a rychlostí nerušeného proudu. Pohyb kolem svislé osy u bezpilotních letounů zvyšuje říditelnost letounu. Tohoto jevu se využívá k provádění správné zatáčky a vylučování boční složky větru při přistávání. U menších UAV se toto nevyužívá. [1]

2.3 Návrh řízení pro bezpilotní letoun

Dle specifikací se jedná o letoun dvoutrupé konstrukce s hornoplošným uspořádáním křídel. Stabilita letu musí převyšovat nad řiditelností. Řízení letounu musí splňovat tyto požadavky:

- Musí být schopen pohybu kolem všech tří os a mít řiditelnou podvozkovou nohu (viz. kapitola 2.3.2).
- Pozemní řízení musí být navrženo tak, aby jej mohl ovládat i méně zkušený pilot (viz. kapitola 3.1).
- Vzdálené řízení umožňující co nejlépe určit nalétnutý okruh a zaměřit daný cíl (viz. kapitola 3.2).
- Bezpečnostní požadavky (viz. kapitola 3.5).
- V případě špatné dohlednosti UAV musí být patřičně osvětlení (viz. kapitola 5).

Dvoutrupá koncepce umožňuje využít možnost dvou směrových kormidel, které jsou účinnější při ovládání letounu kolem svislé osy. Podvozková noha bude z ergonomických důvodů spjata s řízením směrových kormidel pro lepší ovladatelnost na zemském povrchu.

Výškové kormidlo má velkou hloubku a bude nutné zde využít servomotor s větším krouticím momentem. Urychlené proudy vzduchu za rotorem nejspíše ovlivní stabilitu letounu, a to poněkud záporně. Tyto vytvořené rotorové víry narážejí do výškového kormidla, způsobují vibrace a jeho mírné vychýlení. Tento jev by však měl stabilizovat autopilot.

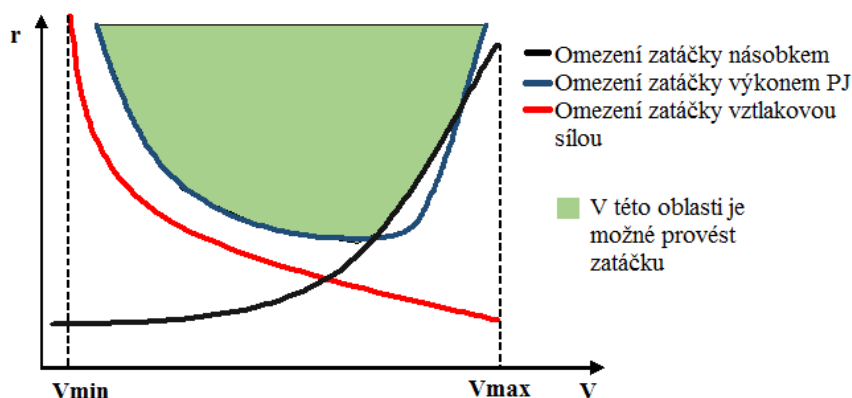
Prostřednictvím vícekanálového řízení se může ovládat každé křídélko zvlášť, to nám umožní využít tzv. diferencovatelná křídélka, které vylepší stabilitu v zatáčkách. Diferencovatelná křídélka musí mít vychylku kormidel na každé straně jinou a to tak, že vždy křídélko, které je v danou chvíli vnitřní, má menší vychylku než to vnější. Rozdíl mezi křídélky by měl být kolem 40°.

Ovládání přípusti plynu bude spjata táhlem s karburátorem motoru. Vychylka indikující volnoběh motoru bude stanovena až v průběhu zalétávání. Důležitou funkcí, kterou by mělo disponovat řízení, ať už pozemní nebo dálkové, je funkce „cut off“, kdy servomotor vytvoří maximální zápornou vychylku, a tak zamezí přípusti plynu. Veškerý tento pohyb řídí servomotory.

2.3.1 Výchyly řídicích ploch a jejich omezení

V mechanice letu se pracuje s celou řadou úhlů, jejich výchyly ovlivňují stabilitu i řiditelnost letounu. Tyto výchyly mají své omezení, které je nutné vždy dodržet.

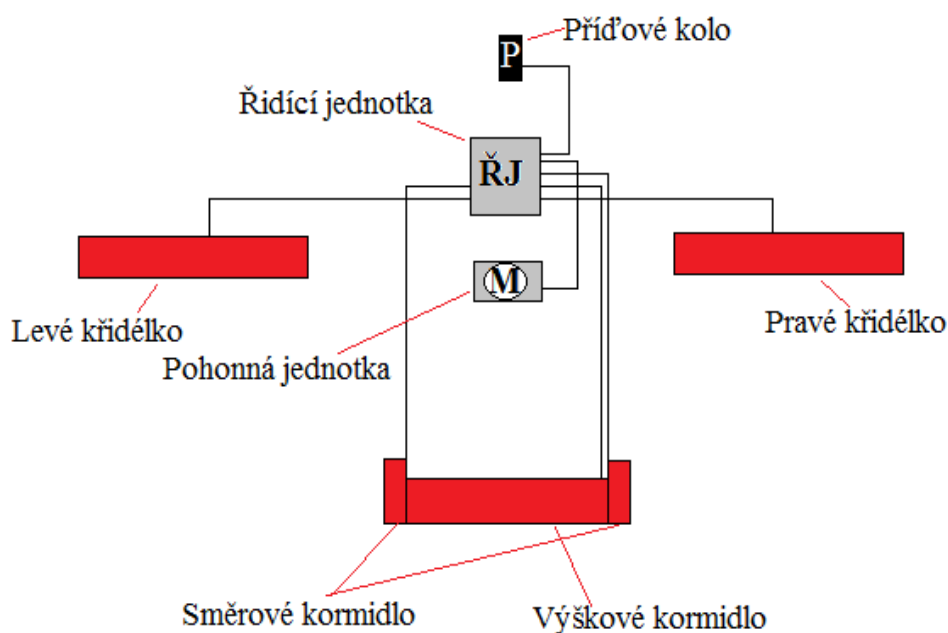
Důležitým omezením je omezení zatáčky, které je zobrazeno v zatáčkovém diagramu v závislosti poloměru zatáčky r , na rychlosti letu v , v ustálené zatáčce (obr. 2.7). Letová obálka, je vymezena minimální rychlostí letu V_{\min} a maximální rychlostí letu V_{\max} .



Obr. 2.7: Omezení zatáčky

Dle uvedeného diagramu (obr. 2.7) lze provádět zatáčku pouze uvnitř obálky, vymezené maximálním tahem motoru, vztlakem a násobkem kladeným na letoun. Pokud dojde ke ztrátě vztlaku při provádění zatáčky s velkým úhlem náběhu, letoun přejde do pádu nebo do vývrtky. Druhé omezení je dáno pohonnou jednotkou bezpilotního letoun, kdy plný výkon PJ již nestačí na tak velký náklon a letoun začne klesat. Třetím a posledním je omezení pevnosti draku, pokud překročíme násobek, může dojít k deformaci draku.

2.3.2 Schéma návrhu řízení a řídicích ploch



Obr. 2.8: Schéma návrhu řízení bezpilotního letounu

2.3.3 Výpočet krouticího momentu pro návrh servomotoru

Návrh servomotoru získáme výpočtem krouticího momentu, který se mírně naddimenzuje asi tak o 10%, tím docílíme optimálního výběru.

$$Mk_1 = SAT \cdot \left[\frac{C \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S}{2} \right] [2]$$

Mk_1 – krouticí moment [N], SAT – střední aerodynamická těživa, c – konstanta, ρ – hustota vzduchu, v – rychlost letu, S – plocha kormidla

Výrobci často uvádí krouticí moment servomotoru v $\text{kg} \cdot \text{m}^3$. Proto je nutné převést výsledné údaje z newtonu na $\text{kg} \cdot \text{m}^3$. Dle rovnice níže. [2]

$$Mk_2 = \frac{Mk_1}{g} [2]$$

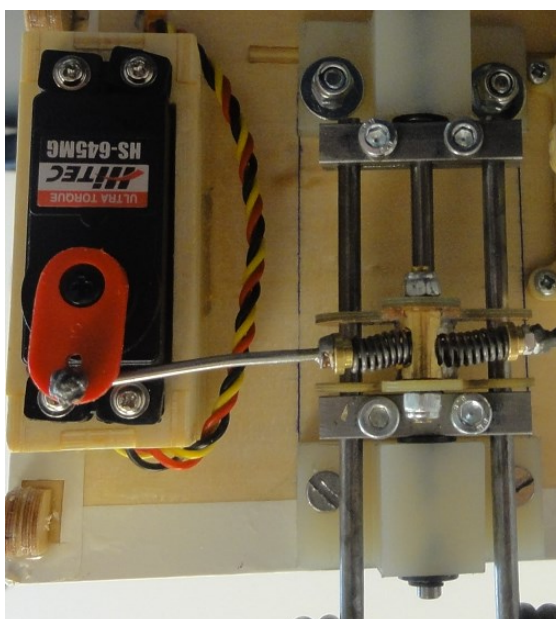
Mk_2 – krouticí moment [$\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1}$], Mk_1 – krouticí moment [N], g – tíhové zrychlení

Dle uvedených výpočtů (příloha F), byly stanoveny servomotory o minimálním výkonu $3,56 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-1}$; $3,91 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-1}$ a $7,43 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-1}$. Tyto hodnoty odpovídají servomotorům typu HS – 422 a HS – 645 MG.

2.3.4 Použité servomotory na bezpilotním prostředku

Servomotor HS – 422 byl využit pro ovládání výškového a směrového kormidla, dále k ovládání přípusti plynu. Tento servomotor se vyznačuje dlouhou životností, spolehlivostí a je poměrně lehký 45g. Maximální zatížení jsou $4 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-1}$ při 6V.

Servomotor HS – 645 MG (obr. 2.9) obsahuje kovové převody, které zvyšují maximální zatížení servomotoru, ale to na úkor hmotnosti, která rapidně vzrůstá. Je také využit pro ovládání polohy kolem podélné osy, příďového podvozkového kola a pro řízení otáček motoru. Maximální zatížení servomotoru je $8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-1}$ při 5V. Hmotnost servomotoru je 56g.



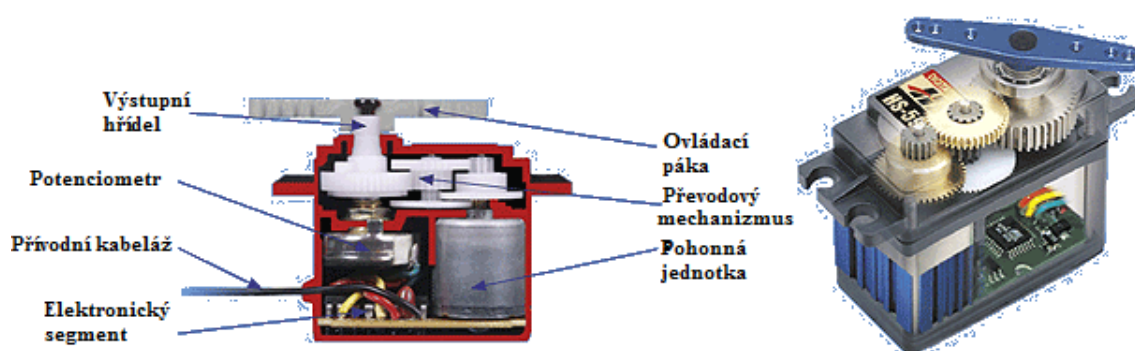
Obr. 2.9: Servomotor HS-645 MG a říditelná podvozková noha

2.4 Servomotory pro řízení bezpilotního letounu v souřadnicovém systému

Servomotory (obr. 2.10) jsou krokové motory (nemusí být vždy), které reagují na náběžnou hranu impulzního signálu a řídí výchylku řídicích ploch. Každý úhel natočení páky má svoji předem danou střidu tak, aby nedošlo k překročení požadované výchylky. Z toho také vyplývá, že směr pohybu páky nemůžeme obrátit přepólováním napájení (to by vedlo ke zničení).

Servomotory se dělí na analogové a digitální. Jejich výkonnostní třídy se dělí dle krouticího momentu. Pokud servomotor disponuje poměrně velkým krouticím momentem, jsou poté kladeny i větší nároky na použitý materiál.

2.4.1 Popis akčních členů



Obr. 2.10: Popis servomotoru [3]

Pohonná jednotka – Tvoří ji nejčastěji právě elektromotor, ale může se jednat i o pneumatický anebo hydraulický systém.

Elektronický segment – Skládá se ze tří pinových lankových vodičů přivedených na desku plošných spojů, která je tvořena z SMD prvků.

Převody mechanismus – Poměr mezi rychlostí a tahem servomotoru určuje převodový poměr. Obvykle se vyrábějí ve dvou provedeních, které mají stejné specifikace, ale liší se převody - např. HS-625 a HS-645. Jedno z provedení je silnější, ale pomalejší, druhé má zvýšenou rychlost na úkor tahu. Převody jsou vyrobeny nejčastěji z plastu, avšak pro větší zatížení a pro větší spolehlivost se využívají kovové. [3]

Potenciometr - Snímá polohu natočení hřídele a uzavírá tedy zpětnou vazbu zajišťující správnou činnost servomotoru. U servomotorů menšího provedení je potenciometr připojen přímo na výstupní hřídel, u servomotorů vyšších kategorií je připojen přes nepřímý náhon, který jej chrání před přenosem vibrací. Zasekávání servomotoru v dané poloze nebo chvění v neutrální poloze je projevem poškození odporové drahý potenciometru. [3]

Výstupní hřídel - Úkolem hřídele je přenést mechanický pohyb na ovládací páku, a tím ji vychýlit. U menších servomotorů je hřídel uložena v plastovém pouzdru. Servomotory vyšších kategorií využívají kuličková ložiska a mají přesnější chod.[3]

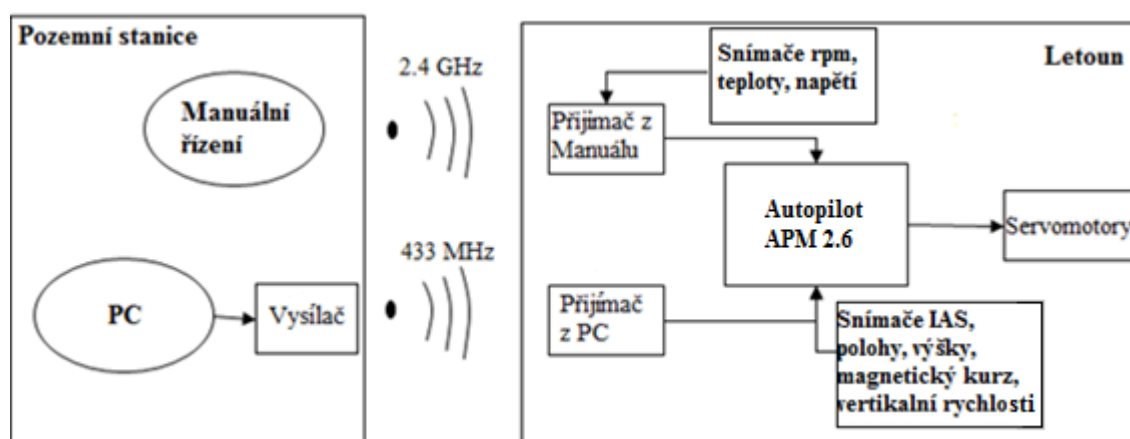
3. Technologie řízení bezpilotního letounu

Primárním cílem řízení bezpilotního letounu je ovládat výchylku servomotoru tak, aby byla zajištěna stabilita a řiditelnost kolem všech tří os.

Jedná se o synchronizaci povelových a řídicích signálů ať už z manuálního řídicího členu nebo mnohem sofistikovanějšího autonomního řídicího členu tzv. vzdáleného řízení. Pro správnou funkci těchto systémů je nutno využívat snímače veličin monitorující let. Tyto snímače snímají pohyb letounu vůči okolnímu prostředí tak, aby docházelo k zpětnovazební korekci systému. Tuto korekci vyhodnocuje řídicí systém a vysílá impulzní signály, které mají buď větší, anebo menší střihu, čímž řídí výchylku servomotorů.

Důležitou vlastností je, že se v případě poruchy nebo jiné nečekané záležitosti dokážou odpojit. Tento jev se nazývá zdvojené řízení.

Propojení (obr. 3.1) je realizováno pomocí separovaných frekvencí o hodnotách 2,4 GHz a 433 MHz.



Obr. 3.1: Schéma řízení letounu z pozemní stanice (vlastní schéma)

3.1 Pozemní řízení bezpilotního letounu

Řízení umožňuje vysílací soustava, která zprostředkovává oboustrannou komunikaci mezi zemí a přijímačem.

3.1.1 Analýza možností řešení

Na trhu se pohybují pouze vysílací soustavy, které pracují na frekvenci 2,4 GHz. Tato frekvence nám vyhovuje, protože nemůže docházet k rušení signálu jinými vysílači o stejné frekvenci. Pro výběr byly stanoveny směrodatné podmínky.

Podmínky pro výběr vysílače byly:

- Frekvence 2,4 GHz.
- 8 až 9 kanálů.
- Zobrazovací jednotka.
- Reverze, upravování výchylek servomotorů.
- Možnost nastavení režimu pro danou konstrukci.
- Telemetrický systém.
 - Teplota motoru.
 - Otáčky motoru.

Tyto podmínky značně zúžily výběr, kandidáty zůstali pouze Spektrum DX8 a Hi-Tec Aurora 9. Kvůli výkonnému přijímači AR8000 a rozvinutější telemetrii byl vybrán vysílač Spektrum DX8.

3.1.2 Ergonomie vysílací soustavy

Ovládací prvky mají intuitivní uspořádání tak, aby vyhovovalo i méně zkušeným pilotům, fotografii a popis je možno nalézt v příloze A. Vysílací soustava se skládá z několika tlačítek, potenciometrů, zobrazovací jednotky a rolovacího tlačítka, tyto prvky jsou přizpůsobeny ovládání tohoto bezpilotního letounu. Na požadavek zalétávacího pilota musela být provedena změna ovládacího prvku, který řídí otáčky motoru, a to z levé strany na stranu pravou, tento zásah se nedal vyřešit programově, ale musel se vyřešit mechanicky záměnou tzv. brzdy.

3.1.3 Komunikace mezi vysílací soustavou a letounem

Z důvodu využití konstrukce letounu je potřeba mít k dispozici minimálně 6 kanálů. Sedmý kanál je využíván pro dálkové ovládání osvětlení letounu. Zpravidla platí, že každá jednotlivě řízená a ovládaná funkce vyžaduje jeden kanál. Nemusí tomu tak být vždy, například servomotory ovládající výchylku křidélek, mohou být ovládané pomocí jednoho kanálu, anebo separovaně každý servomotor zvlášť, tento separovaný způsob je využit také tady. Kanál je tedy frekvence, která je přiřazená k určité funkci v pásmu 2,4 GHz.

Při létání v oblasti, kde je více RC letounů v pohybu, bylo nutné u starších typů vysílačů mít u sebe náhradní krystal o jiné frekvenci. U DX8 už tomu tak není, přijímač s vysílačem je párován a modulace signálů je směrodatná pouze pro jeden přijímač. Komunikační protokol DSS umožňuje potlačit ostatní signály pracující na frekvenci 2,4 GHz a to tak, že úzkopásmový signál, který bývá snadno rušen, převede na širokopásmový signál. Zároveň zde nedochází ani k poklesu výkonu. [4]

3.2 Systém vzdáleného řízení bezpilotního letounu

Operátor nedokáže nalétnout měřený objekt přesně, protože vizuální určení polohy objektu vůči letounu je zkresleno nedokonalostí lidského oka, proto se využívá systému vzdáleného řízení prostřednictvím autopilota. Tento systém je určený pro možnost si naplánovat let dle GPS souřadnic letu. Údaje takto vzniklé se pak dále zpracovávají v programu GIS.

3.2.1 Analýza možností řešení

Na Českém trhu zatím nejsou autopiloty moc rozvinuty, ale na zahraničních trzích lze objevit několik různých druhů zvláště od společností 3DR robotics a Amazon.

Směrodatné podmínky pro výběr autopilota:

- Přenos dat v reálném čase.
- Možnost připojení pitot-statického snímače a zaznamenávat IAS.
- Gyroskop, magnetický kompas, GPS.
- Plánování letu s možností příkazu „Let’ sem“.

Podmínky, které byly klíčové pro výběr, splňuje většina autopilotů například Ardupilot, Pixhawk nebo FY-31AP. Ardupilot vychází nejlépe v poměru cena/výkon a je založený na řídicím systému Arduino. Naskytla se tedy teorie, že by šlo naprogramovat Ardupilota tak, aby mohl zpracovávat údaje i z meteorologických snímačů a tak ušetřit náklady za další řídicí systém Arduino. Tato teorie byla posléze zamítnuta z důvodu chybějících digitálních portů.

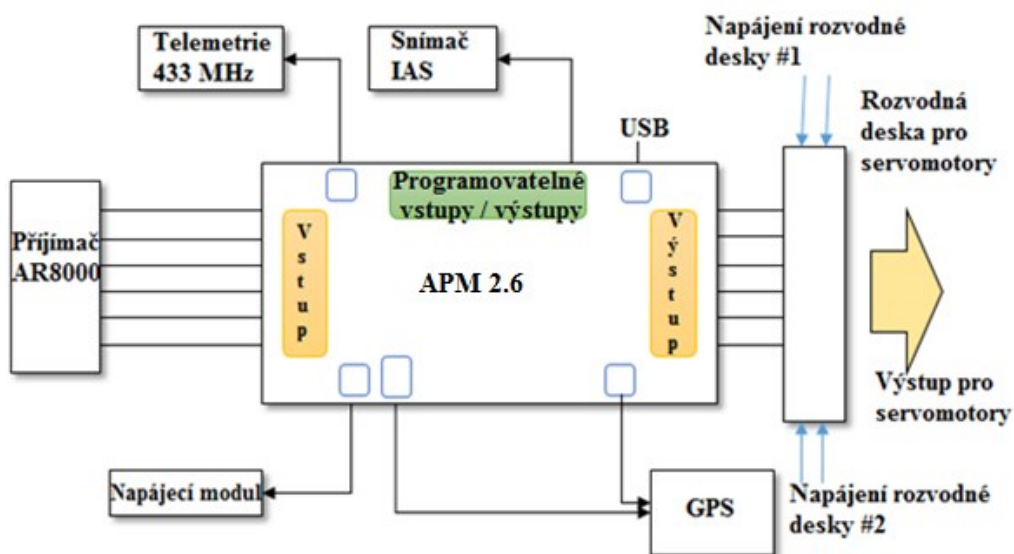
3.2.2 Autopilot APM 2.6

Ardupilot Mega 2.6 je profesionální autopilot, který je založený na platformě Arduino Mega AT 2608 je obohacen o tříosý gyroskop, magnetický kompas a další prvky, které tvoří IMU systém. Systém Ardupilota je tzv.: „open source“, který umožňuje si naprogramovat Ardupilota dle speciálních požadavků. Ardupilot má již předem definovaný zdrojový kód, který se pomocí firmwaru přizpůsobí dané konstrukci letounu. Tento kód jde sice pozměnit, ale nedoporučuji to.

Technický popis

Ardupilot (obr. 3.2) má k dispozici 8 vstupů pro řídicí impulzy z přijímače manuálního řízení a 8 výstupů, které jsou připojeny přímo k servomotorům. Tyto vstupní a výstupní porty mohou přenášet napájení a impulzní signál, nicméně v našem případě je využita pouze šestice portů, které přenáší impulzní signál. Napájení servomotoru je

prováděno z externího zdroje. Ardupilot má dále k dispozici 12 programovatelných vstupních a výstupních portů, analogové porty, SPI, I²C, GPS, PM. Fotografie a popis je možno naléznout v příloze A.



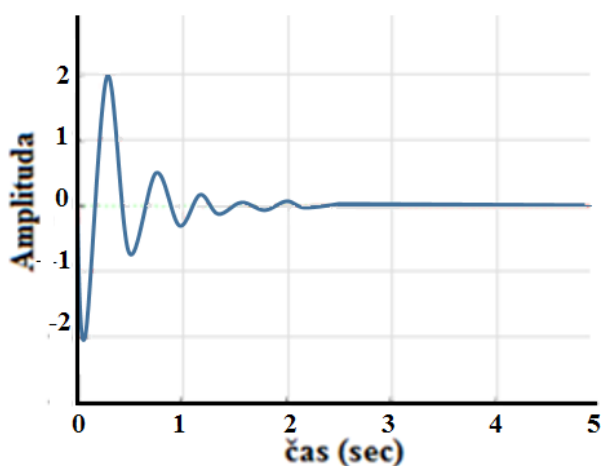
Obr. 3.2: Blokové schéma Ardupilota (vlastní schéma)

3.2.3 Princip a funkčnost

Ve zjednodušeném tvaru se autopilot skládá z PID regulátoru dále z Fuzzy systému, jednotky IMU, paměti dat a následně z procesoru, jenž komunikuje s jednotlivými perifériemi.

PID regulátor

Většina autopilotů je založena na principu PID regulátoru. Hlavním úkolem PID regulátoru je stabilizovat let a to tak, že pokud například bude poryv bočního větru, vychýlí se výchylky kormidel, což způsobí reakci například jako je na obr. 3.3 a sleduje se hlavně doba, za kterou se výchylka a stabilizuje a s jakou přesností. [5]



Obr. 3.3: Názorný graf PID regulátoru

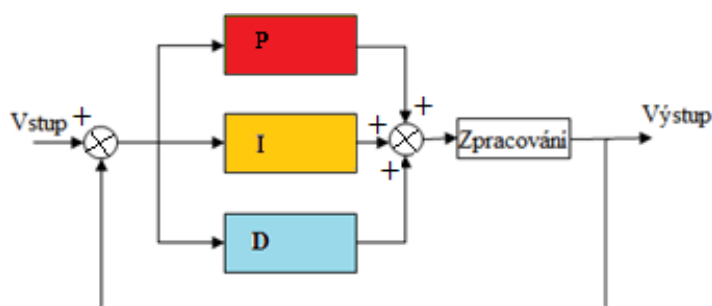
Základní rovnice regulátoru může být vyjádřena takto:

$$u(\vartheta) = u_p(\vartheta) + u_I(\vartheta) + u_D(\vartheta) \text{ [5]}$$

$u(\vartheta)$ – Stabilizační koeficient, $u_p(\vartheta)$ – proporcionální složka,

$u_I(\vartheta)$ – integrační složka, $u_D(\vartheta)$ – derivační složka

PID regulátor pracuje na principu tří složek, kdy integrační složka odstraňuje trvalou regulační odchylku a vlivem derivační složky se zlepšuje stabilita obvodu. Na začátku změny převládá derivační složka regulátoru, poté s narůstajícím časem začne převládat integrační složka regulátoru. PID regulátor lze vylepšit zapojením do kaskády.



Obr. 3.4: PID regulátor

PID řízení je široce využitelné a účinné. K dosažení co největší možné účinnosti potřebujeme pouze správné PID koeficienty. Obr. 3.4 poukazuje na jednoduché základní zapojení PID regulátoru.

FUZZY systém

Fuzzy logiku si můžeme představit na příkladu.: Máme-li pojem horká voda, potřebujeme tedy definovat rozsah slova horká. Jaká teplota může být očekávaná pod pojmem horká?

Tento systém umožní PID regulátoru se automaticky přizpůsobit vnějším vlivům. Využívá tzv. Fuzzy řídicích metod.[5] [6]

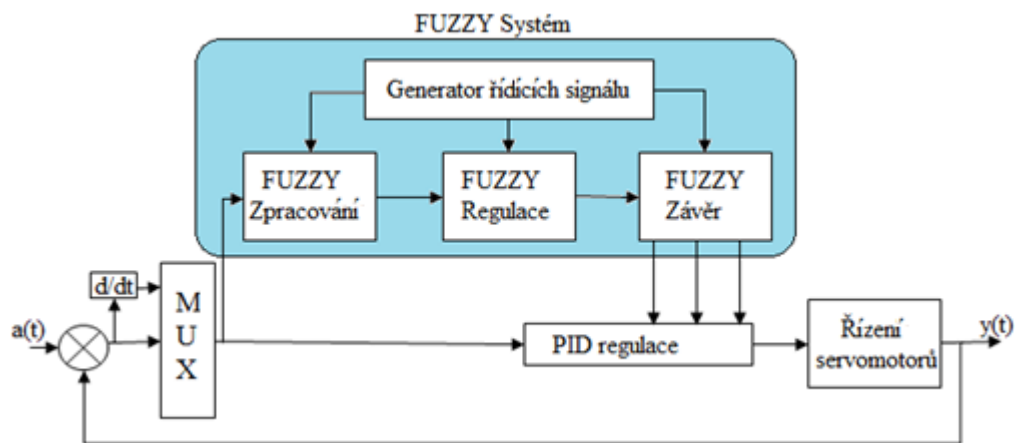
$$u_p = u_{p0} + \Delta u_p \text{ kde } \Delta u_p : -5 \text{ do } 5$$

$$u_I = u_{I0} + \Delta u_I \text{ kde } \Delta u_I : -0.02 \text{ do } 0.02$$

$$u_D = u_{D0} + \Delta u_D \text{ kde } \Delta u_D : -8 \text{ do } 8$$

u_p – proporcionální složka, u_I – integrační složka, u_D – derivační složka,

Struktura (obr 3.5) představuje zdvojenou smyčku. Vnitřní smyčka rozhoduje o určité přiřazené hodnotě, která bude dosazena a výstupní slouží pro FUZZY řízení. [5]



Obr. 3.5 Fuzzy systém [5]

Fuzzy řízení je využito pro fly by wire řízení podle GPS souřadnic, nebo také může být využito pro navádění raketových střel na cíl.

Pro přiblížení, fly by wire je řízení podle zeměpisné délky a šířky, je rozděleno do dvou separovaných modulů. Jsou separovány jako vnitřní a výstupní smyčky. Vstupní smyčka slouží ke stabilizaci letounu, výstupní smyčka slouží pro následování navigačních instrukcí. [5]

Vnitřní jednotka měření (IMU)

Internal measurement unit se využívá pro přesné navádění letounu. IMU byla primárně vyvíjena pro armádu a vesmírný program, ale dnes se již využívá běžně v letectví. IMU využívá gyroskop a akcelerometr pro měření momentální rotace a zrychlení. Výsledné měření určí počáteční polohu letounu.[5][7]

Zařízení MPU-6050 slouží v ardupilotovi jako tříosý akcelerometr a tříosý gyroskop. Má k dispozici technologii Motion-Fusion, která umožnila výrobcům eliminovat nákladné, a složité části IMU. Výsledkem je jednoduchý a výkonný senzor, který se hojně využívá v tabletech, smartphonech, zbraních a SmartTV. Připojení k procesoru (master) je provedeno pomocí sběrnice I²C.[8]

3.3 Navigační systém bezpilotního letounu

Je způsob, díky kterému letoun dokáže létat z bodu A do bodu B. Tyto navigační body se určí na mapě uživatelského softwaru Mission Planner.

3.3.1 Trať k navigačnímu bodu

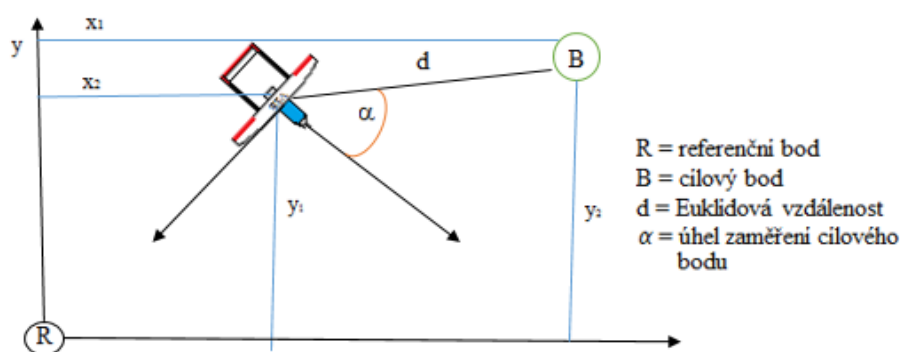
Vypočtení vzdálenosti trati k dalšímu bodu lze dosáhnout nejjednodušeji vypočítáním euklidovského prostoru mezi dvěma body, tedy letounem a navigačním bodem. [5]

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

x_1, x_2 – souřadnicové body; y_1, y_2 – souřadnicové body; z_1, z_2 – souřadnicové body

3.3.2 Zaměření navigačního bodu

Zaměření je vypočteno poměrně jednoduše určením úhlu mezi rychlostním vektorem a navigačním bodem. Aktuální rychlostní vektor se vypočte využitím DCM algoritmu. Obr. 3.6 zobrazuje potřebný úhel k zaměření. [5]



Obr. 3.6: Zaměření bodu

Vzorec pro výpočet zaměření bodu, vyvozen z obr. 3.6.

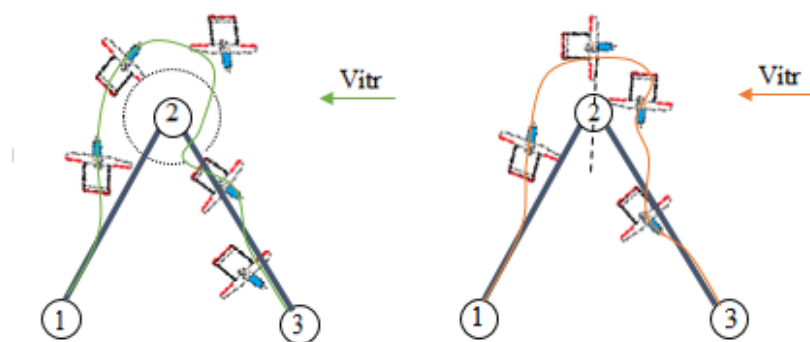
$$\tan \alpha = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

3.3.3 Průlet cílovými body

Průlet cílovými body je prováděn instrukcemi, které určuje Ardupilot. Existují 2 metody, jak a kdy bezpilotní letoun může dosáhnout cílového bodu popřípadě destinace. [5]

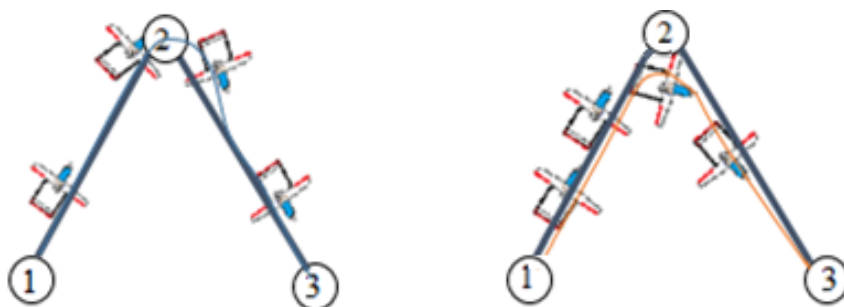
První metoda (obr. 3.7 vlevo) je, že letoun dosáhl požadovaného bodu, tedy vzdálenost od cílového bodu je menší, nebo rovna určité dané hodnotě. [5]

Druhá metoda definuje cílový bod, kterého se dosáhne přímkou mezi cílovým bodem a místem přeletu. Obr. 3.7 napravo popisuje toto přiblížení, kdy při bočním poryvu větru je umožněn rychlejší průlet navigačním bodem. [5]



Obr. 3.7: Průlet body s bočním větrem [5]

Další situace nastává, pakliže je minimální poryv větru, v tomto případě se využívá metody rychlého průletu jednotlivými body (obr. 3.8). [5]



Obr. 3.8: Rychlý průlet body [5]

3.4 Výběr snímačů pro řízení bezpilotního letounu

Výběr snímačů byl stanoven, na základě bezpečnostních a funkčních kritérií, která korespondovala se zadáním projektu. Určitá část snímačů však již byla součástí autopilota.

Pro optimální chod jsou do letounu zakomponovány snímače:

- Orientace v prostoru.
- Zrychlení v prostoru.
- Polohy v prostoru.
- Rychlosti vzduchu.
- Otáčky motoru.
- Napětí na baterii.
- Teplota motoru.

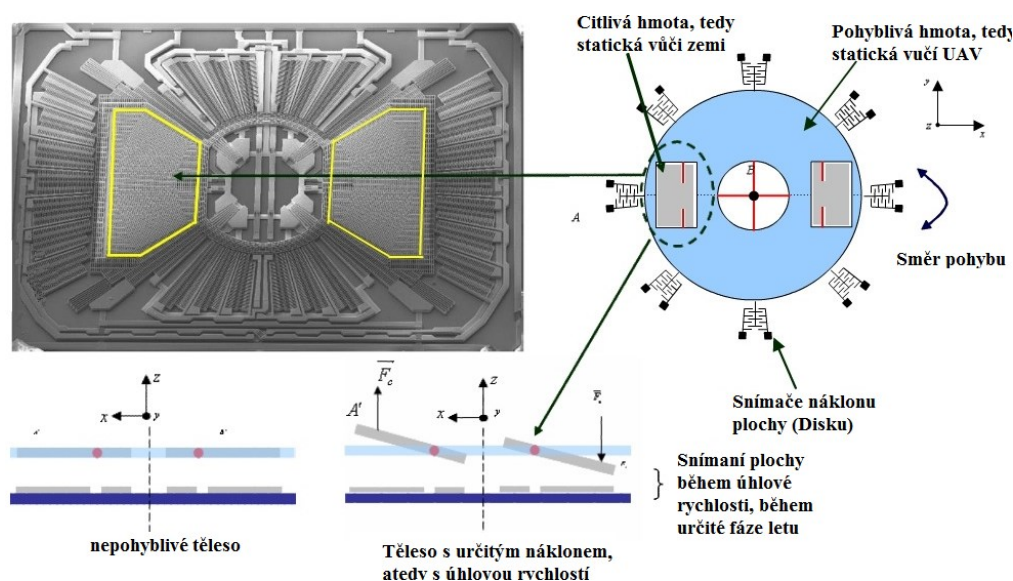
Pomocí autopilota a jeho telemetrického systému jsou přenášeny data na zem ze snímačů: polohy, zrychlení a rychlosti. Tyto data jsou následně zobrazeny na zobrazovací jednotce, notebooku. Snímače otáček, teploty motoru a napětí na sekundární baterie jsou

řízené telemetrickým modulem vysílací soustavy Spektrum DX8, získaná data se zobrazují přímo na displej vysílače. Pilot tedy vidí ihned v jakém stavu je pohonný systém letounu a v případě kolísání může ihned zahájit nouzové operace.

3.4.1 Snímač orientace v prostoru

Tento snímač pro orientaci v prostoru se nazývá Gyroskop, což je obecně přístroj, který obsahuje setrvačnick, a tak zachovává polohu osy své rotace v inerciálním prostoru. Přesnost gyroskopu závisí na stabilitě udržení jeho otáček. [9]

Senzor od společnosti ST electronics patří do skupiny MEMS senzorů obsahující čipy, které mají v sobě zabudovanou mechanickou část (obr. 3.9). Jedná se o citlivou hmotu, jež je vždy rovnoběžná se zemským povrchem, a tudíž mění úhel s pohyblivou hmotou pohybující se dle náklonu letu a jeho určité fáze. Tímto se mění vzdálenost od ploch a tedy i kapacita, která je měřitelná. Gyroskop rozpoznávající tři osy, pak musí disponovat trojicí takovýchto senzorů, pro přesné určení změny polohy v prostoru.[10]



Obr. 3.9: Princip tříosého gyroskopu MEMS [10]

Změna vzdálenosti pohyblivé hmoty od citlivé hmoty se přemění ve změnu kapacity, a ta je následně převedena na digitální signál, který je poté konvertován procesorem. Akcelerometr (viz. kapitola 3.4.2) a gyroskop je integrován na desce autopilota a řadí se do kategorie IMU. V problematice IMU gyroskop zajišťuje orientaci v prostoru kolem 3 os.

3.4.2 Snímač zrychlení v prostoru

Akcelerometr, je elektronické zařízení, které se využívá pro měření akcelerace. V dnešní době využívají akcelometry mikroskopický piezoelektrický krystal. Pokud se akcelerace mění, zrychlení působí na hmotu snímače, která pak stlačuje piezoelektrický prvek,

generující elektrický náboj úměrný stlačení. Tento náboj je poté konvertován FET tranzistorem na napěťový výstup. [11]

3.4.3 Snímač polohy v prostoru

Snímač tvoří GPS a kompas, které jsou umístěny na vyvýšeném místě pod krytem letounu tak, aby GPS signál nebyl ničím rušen.

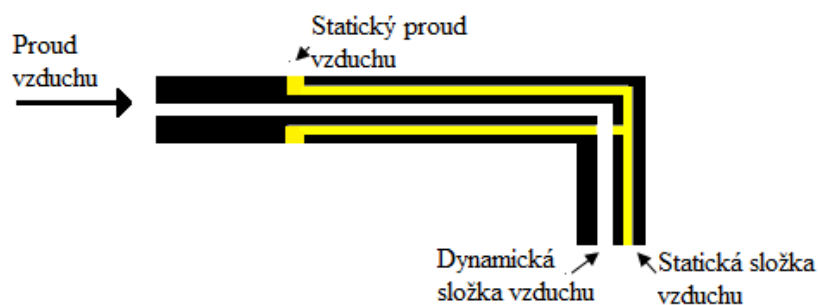
Autopilot využívá tříosý magnetický kompas HMC5883L dodávaný firmou Honeywell. Kompas využívá technologii MEMS. Pracuje na principu zachycení magnetického severu pomocí geomagnetických částí. Přesnost tohoto kompasu je od 1° do 2° . Zajímavostí je, že se zde využívá technologie AMR, která poskytuje odolnost vůči magnetickému rušení. Spolu s magnetickým kompasem je i na stejném místě umístěn přijímač GPS, jehož úkolem je přijímat aktuální polohu letounu vůči zemi. [12]

GPS přijímač je pasivní prvek, který přijímá a analyzuje GPS signály, na základě nichž pak provádí jednoduché výpočty. Podmínkou pro udání polohy je znalost pozice nejméně 4 satelitů a jejich vzdálenosti od přijímače. Vzdálenost satelitů od přijímače se vypočte pomocí časové prodlevy mezi vysílaným signálem ze satelitů a přijímaným. [13]

V bezpilotním letounu jsou využity 2 přijímače GPS, které pracují nezávisle na sobě. GPS přijímač lokalizuje UAV v prostoru a poskytne mu GPS souřadnice. Souřadnice zpracovává autopilot, dále je předává svým podsystémům a následně je vysílá na zem, kde je zpracovává program Mission Planner. Bod takto vzniklý je zakreslen do mapy.

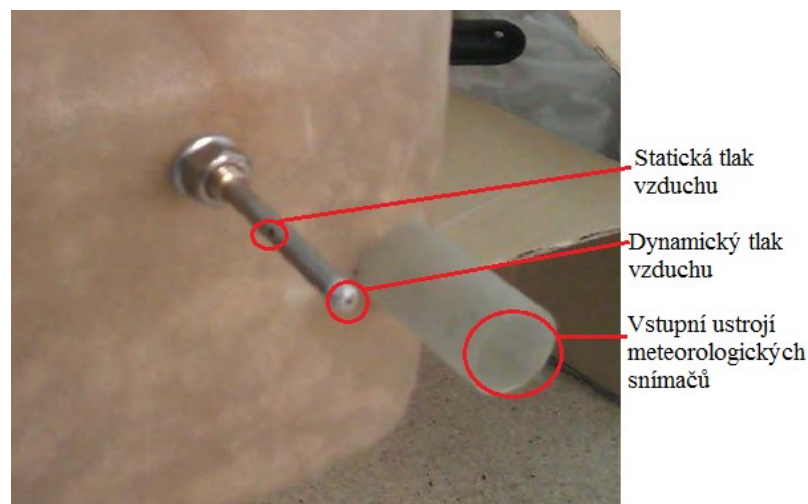
3.4.4 Snímač rychlosti proudění vzduchu

Hlavní částí snímače je pitot-statická trubice pracující na principu snímání dvou různých složek vzduchu, a to statické a dynamické (obr. 3.10). Tyto složky vzduchu jsou dále porovnávány membránou, která se nachází mezi komorami složek vzduchu. V závislosti na poloze membrány je následně generován elektrický signál, který je vyhodnocen autopilotem.



Obr. 3.10: Vnitřní struktura pitot-statické trubice

V UAV je pitot-statická trubice umístěna na přídě vedle vstupního ústrojí meteorologických snímačů (obr. 3.11). U bezpilotního prostředku jsou složky vzduchu přivedeny z pitot-statické trubice do rychloměrné komory pomocí silikonových trubic, kde jsou následně porovnávány a generovány data.



Obr 3.11: Pitot-statická trubice

3.4.5 Optický snímač otáček motoru

Snímání otáček motoru je řešeno pomocí optického snímače, jehož úkolem je sledovat chod válce z horní úvratě do dolní úvratě. Tento snímání úkon je převeden do elektrického signálu, jenž je zasílán do vysílací soustavy Spektrum DX8, kde je zobrazen na display v jednotkách rpm.

3.4.6 Měření úrovně napětí a snímání teploty motoru

V letounu jsou umístěny tři voltmetry, které měří napětí na bateriích. Dva pro sekundární baterii a jeden pro primární baterii.

Snímání teploty motoru probíhá pomocí jednoduchého odporového snímače teploty, který je připevněn v bezprostřední blízkosti motoru tak, aby naměřené hodnoty odpovídaly aktuálnímu stavu motoru.

3.5 Bezpečnostní prvky bezpilotního letounu.

Při létání je na bezpečnost vždy kladen velký důraz, ať se jedná o velký letoun nebo o bezpilotní letoun. Autopilot umožňuje bezpilotnímu letounu ošetřit nouzové situace, kdy již stroj není ovládán operátorem, či hrozí výpadek systému a UAV se nachází stále ve vzduchu. Tyto situace mohou nastat za těchto okolností:

- Dojde-li ke klesnutí otáček motoru pod stanovené minimum.
- Nastane-li ztráta dosahu vysílače Spektrum anebo telemetrie autopilota.
- Vznikne-li závada avioniky.
- Vybije-li se primární baterie.
- Vybije-li se sekundární baterie.

Pokud dojde ke klesnutí otáček pohonné jednotky pod stanovené minimum, může dojít i k jejímu zhasnutí. Tyto minima lze určit v programu Mission Planner, a to nastavením minimální výchylky servomotoru pro regulaci otáček motoru. [14]

Pokud nastane ztráta signálu vysílače popřípadě telemetrie autopilota po dobu delší než 20 sekund. Autopilot přejde do bezpečnostního modu „fail safe“, který je schopný doletět zpět na uložené GPS souřadnice, které označují domovskou základnu a kroužit nad tímto místem, dokud nebude obnoveno spojení mezi vysílačem a bezpilotním letounem.[14]

Řízení letounu je zdvojené, tudíž při výpadku autopilota jsme schopni řídit letoun manuálně.

Kapacita a napětí primární baterie je neustále sledováno „power modulem“. Pokud kapacita baterie klesne pod minimum, vyskytne se na zobrazovací jednotce varovný signál.

Napětí na sekundární baterii je zobrazováno přímo na vysílači Spektrum. Toto napájení je i chráněno autopilotem a aktuální stav baterie je zobrazován v procentech na zobrazovací jednotce.

Nebezpečné situace, které mohou nastat, ale nejsou nijak elektronicky ošetřeny, jsou:

- Požár na letounu v různých fázích letu.
- Zhasnutí pohonné jednotky v různých fázích letu.

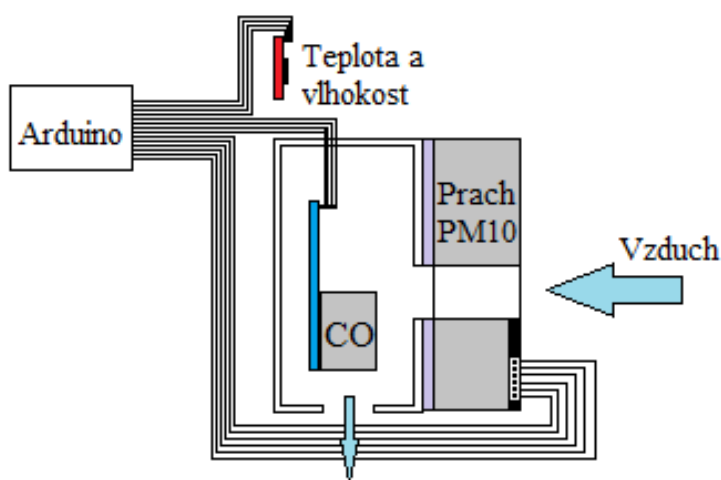
Snížit riziko vzniku požáru můžeme použitím nehořlavých materiálů, avšak balza využitá na letounu je hořlavá.

Náhlé zhasnutí pohonné jednotky lze řešit padákem. Padák na tomto bezpilotním letounu měl být využit, ale z časových a technologicky náročných důvodů nebyl zkonstruován.

Výše popsané nebezpečné situace jsou pro letoun fatální a jejich řešení záleží pouze na zkušenosti pilota.

4. Řízení systému snímání znečištění ovzduší a jeho částečná realizace

V rámci vědeckého účelu bylo zapotřebí navrhnout vhodné řízení pro měření znečištění ovzduší. V podmínkách, které doprovázely tento projekt, bylo zadáno snímání těchto veličin: prach, teplota, vlhkost, oxid uhelnatý, oxid dusičitý a oxid siřičitý (obr. 4.1). Kvůli omezení počtu operací za jednotku času řídicího systému Arduino bylo nutné oxid dusičitý a oxid siřičitý odstranit.



Obr. 4.1: Schéma zapojení řídicího systému Arduino a meteorologických snímačů

4.1 Analýza současného stavu řízení meteorologických snímačů

Pro řízení snímačů bylo zapotřebí vybrat vhodný řídicí systém, který lze naprogramovat tak, aby zobrazoval naměřená data ze snímačů, a zároveň splňoval tyto podmínky.

- Možnost ukládání dat na SD kartu.
- Připojení digitálních i analogových výstupů.
- Výstup pro napájení snímačů 5V.

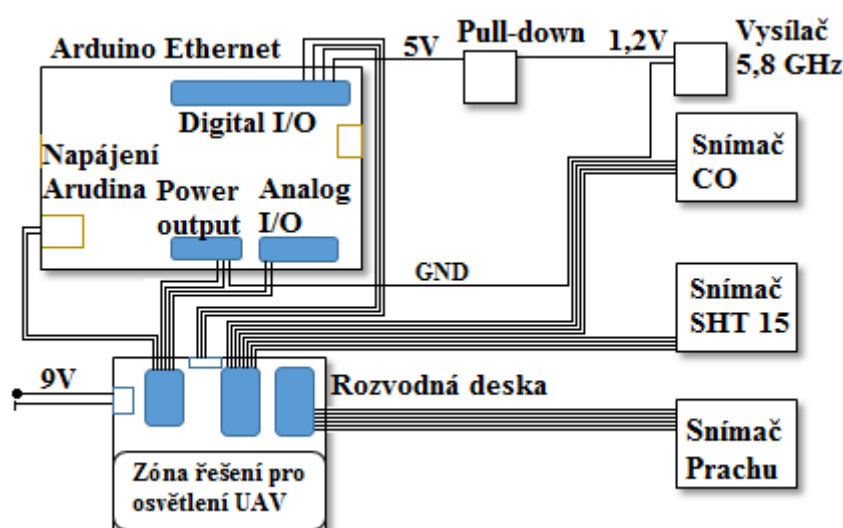
Na trhu se pohybují systémy vhodné pro řešení tohoto problému od společností Arduino a BeagleBone. Beagle bone black je výkonný systém s procesorem 1Ghz a 512 MB RAM, jeho programování probíhá přes mini USB kabel v jazyce C. Možnost ukládání na SD kartu neposkytuje Beagle bone přímo, bylo by nutné dokoupit slot pro SD kartu. Arduino ethernet je levnější řešení, avšak jeho výkony zaostávají za Beagle bone. Splňuje všechny

požadavky a slot na SD kartu je integrován na desce. Nevýhodou krom nižšího výkonu je programování přes FTDI kabel, který není součástí balení, je nutno jej dokoupit. [15][16]

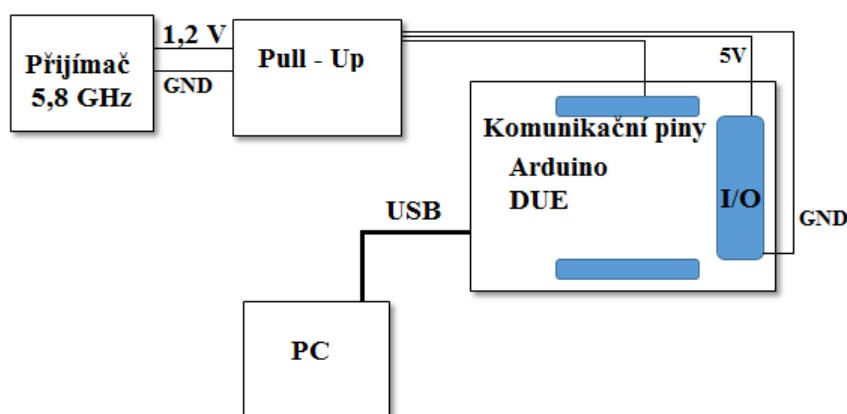
Přes nevýhody systému Arduino, byl vybrán právě tento systém, a to pro jeho rozšířenost na trhu a dobrou komunikaci s vývojáři systému Arduino na oficiálních webových stránkách a fórech. Mimo jiné je Arduino i rozměrově menší.

4.2 Řídicí systém Arduino

Je tzv. „Open Source“ systém, který dokáže upravovat informace z vstupních portů a dále je přenášet na výstupní porty. Svou univerzálností má Arduino široké využití jako například při řízení akčních členů, detekci veličin anebo komunikaci.



Obr. 4.2: Blokové schéma zapojení Arduino Ethernet v Letounu



Obr. 4.3: Blokové schéma zapojení Arduino Due na zemi

V letounu byl využit Arduino Ethernet s ethernetovým konektorem a slotem pro SD karty (příloha A), na kterou lze přímo ukládat data. Původní myšlenka byla vytvořit ethernetovou síť a přenášet data pomocí 3G modemu na portál Xively, kde by měli přístup

všichni uživatelé, kteří by mohli sledovat toto měření v reálném čase. Od tohoto projektu se upustilo kvůli nutnosti pořízení tarifu mobilního operátora. Nakonec bylo využito komunikace mezi letounem a zemí, kdy informace jsou přenášeny na zem pomocí 5,8 GHz. Data na zemi zpracovává Arduino Due (příloha A) a přenáší je do PC pomocí mini USB portu.

Arduino se programuje pomocí programovacího jazyka C, který je mírně poupravený. Zdrojový kód je možné nalézt v příloze E.

4.2.1 Zpracování naměřených dat

Jsou navrženy dva způsoby jak data dále zpracovávat, a to primární způsob a sekundární způsob.

Primární způsob je, že se data automaticky ukládají na SD kartu pro případ ztráty komunikace, slot na mikro SD kartu je umístěn pod trupem letounu. Informace se ukládají v jednoduchém textovém dokumentu. „Surová“ data, dále musí být ošetřena o chybovost, která se vyskytla v důsledku variabilního proudění vzduchu. Po úpravě se manuálně nahrávají do informačního systému GEODIS, kde jim je přidělena GPS souřadnice.

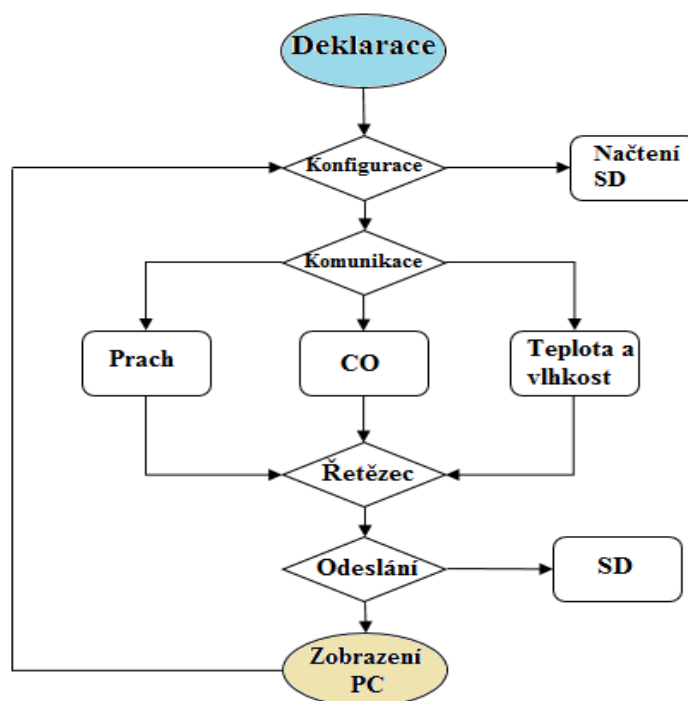
Sekundární způsob je, že se v reálném čase přenáší informace na zem do Arduino Due, který je propojený pomocí mini USB portu s notebookem. Tyto informace jsou pouze informační a s jejich pomocí může operátor bezpilotního letounu vystopovat zdroj znečištění ovzduší. Bezdrátový přenos probíhá pomocí frekvence 5,8 GHz, spolu s obrazem dat. Zde vznikl problém s přenosem dat mezi arduiny. TTL logika pracuje na principu „log. 1“ 4V – 5V a „log. 0“ 0V - 0,8V. Přenos probíhá tak, že máme k dispozici dva porty (audio konektory), které jsou volné pro přenos dat spolu s obrazem, maximální napětí, které je možno přenášet, jsou 2V, proto bylo zapotřebí amplitudu těchto dat uměle snížit, a to zapojením několika diod do série. Na každé diodě je úbytek napětí 0,6V. Na zemi u výstupu z přijímače je vložen spínací tranzistor, který reaguje na napětově slabý vstupní signál na bázi a zesiluje jej opět do podoby TTL.

4.3 Částečné programování řídicího systému Arduino

Zdrojový kód byl navrhnut a vytvořen dle algoritmu (obr 4.4). Návod jak uvést snímače do chodu, byl nalezen na webových portálech [17],[18],[19], avšak bylo možné využít pouze kořen zdrojového kódu. Vše ostatní muselo být znovu naprogramováno a přizpůsobeno způsobu využití a jeho požadavkům. Se znalostmi jazyka C a komunikací s vývojáři Arduino byl vytvořen plně funkční zdrojový kód (příloha E), který zastává

následující úkony: deklarovat hodnoty, nakonfigurovat přenos, zpracovávat data, matematicky je upravovat, uložení do řetězce, zaslání dat na kartu SD a zobrazení dat na PC.

4.3.1 Algoritmus řízení meteorologických snímačů



Obr. 4.4: Algoritmus řešení pro řízení meteorologických snímačů

Zkráceně systém postupuje dle následujících instrukcí. Deklaruje proměnné a k určitým proměnným i číslo pinu, tedy místa, kde bude dostávat vstupní signál z jiného zdroje například D2. Dále se na konfiguruje komunikační protokol, a pokud je dostupná mikro SD karta, načte se pomocí následujícího příkazu.

```

if (!SD.begin(4)) {
  Serial.println("pametova karta neni k dispozici");
  return;
}
Serial.println("pametova karta je ve slotu, bude probihat zapis.");

myFile = SD.open("test.txt", FILE_WRITE);
  
```

Obr. 4.5: Část zdrojového kódu pro inicializaci SD karty

Systém následně započne komunikaci se snímači a to tak, jak je popsáno v této bakalářské práci u každé kapitoly snímače v pod odrážce „Průběh cyklu komunikace“. U snímače oxidu uhelnatého pouze přečte hodnotu pomocí příkazu „analogRead“. U snímače teploty a vlhkosti má systém předem definovanou knihovnu, tím pádem lze využít definovanou instrukci „cidlo.read“.

```

void loop(){
    i=i+1;
    digitalWrite(ledPower,LOW); // zapnutí IR diody v prachovém snímači
    delayMicroseconds(delayTime); // vyčkávání
    dustVal=analogRead(dustPin); // čtení hodnoty z prachového snímače
    ppm = ppm+dustVal;
    delayMicroseconds(delayTime2);
    digitalWrite(ledPower,HIGH); // vypnutí IR diody v prachovém snímači
    delayMicroseconds(offTime);
    sensorValue = analogRead(1); // čtení hodnoty ze snímače CO_
    teplota = cidlo.readTemperatureC(); // čtení teploty ze snímače SHT 15
    vlhkost = cidlo.readHumidity(); // čtení vlhkosti ze snímače SHT 15

```

Obr. 4.6: Část zdrojového kódu pro komunikaci se snímači

Zatímco v proměnných teploty, vlhkosti a „sensorValue“ již jsou zaznamenány momentální hodnoty ze snímačů, u snímače prachu se musí ještě proměnná „ppm“ matematicky upravit, a to dle následujícího příkazu.

```

voltage = ppm/i*0.0049;
dustdensity = 0.17*voltage-0.1;
if (dustdensity < 0 )
    dustdensity = 0;
if (dustdensity > 0.5)
    dustdensity = 0.5;

```

Obr. 4.7: Matematická úprava hodnoty prachového snímače

Výsledná hodnota „dustdensity“ je už pouze ošetřena o chybovost, a to podmínkami, pokud hodnota bude menší než 0, na výsledek přiřadí 0, pakliže bude větší než 0,5, přiřadí na výsledek 0,5. Předposledním úkonem je uložit hodnoty do řetězce. Proměnná „dustdensity“ se ještě násobí proto, aby se její hodnota přesunula z $\text{mg}\cdot\text{m}^3$ na $\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$. Hodnoty 9, 2, znamenají počet číslic před a za desetinou čárkou.

```

String dataString = "";
dataString += "ug*m3 = ";
dataString += dtostrf(dustdensity*1000, 9, 2, s);
dataString += ",      °C";
dataString += dtostrf(teplota, 8, 2, s);
dataString += ",      %";
dataString += dtostrf(vlhkost, 8, 2, s);
dataString += ",      ppm";
dataString += dtostrf(sensorValue, 8, 1, s);
dataString += ",      sec";
dataString += dtostrf(timer, 8, 0, s);
i=0; //vynulování proměnné i
ppm=0; //vynulování proměnné ppm
sendData(dataString);
Serial.println(dataString);

```

Obr. 4.8: Uložení hodnot do řetězce

Poslední úkon, tedy uložení hodnot na mikro SD kartu i celý zdrojový kód je možno nalézt v příloze E taktéž i pro Arduino Due.

4.2 Snímač prachu

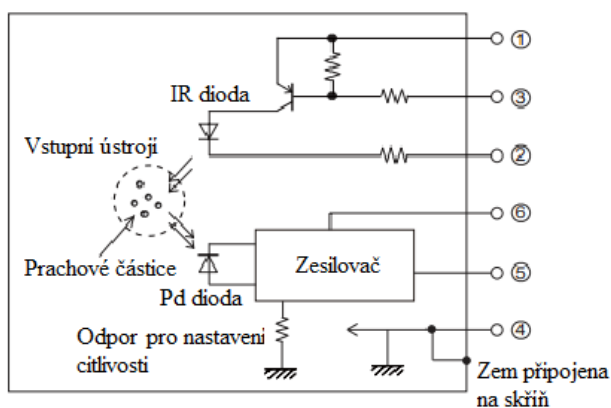
V dynamickém prostředí se neustále mění proud vzduchu, proto musel být využit snímač, který pracuje na principu IR diody (obr. 4.9), nikoli na váhovém mechanismu. Ale i tak nám to nezabrání vzniku chyby v důsledku proměnlivého prostředí. Proto musel být pořízen snímač IAS, jehož data se využijí při zpracování hodnot naměřených z prachového snímače a poté se matematickou metodou vyhodnotí.



Obr. 4.9: Snímač prachu Sharp [18]

Princip snímání

Jak již bylo zmíněno, snímač pracuje na principu IR diody. Proud vzduchu různých částic vstupuje do vstupního ústrojí snímače, kde IR dioda vyzařuje infračervené světlo, jehož intenzitu na protější straně zachytává fotodiody. Intenzita paprsku se snižuje na úkor počtu částic, které snižují průsvitnost IR diody. Velikost napětí na výstupu z fotodiody je následně zesílena zesilovačem a zaslána na výstupní port senzoru (obr. 4.10). Citlivost senzoru lze redukovat změnou odporu. Arduino dle zdrojového kódu přijímá tyto data a vyhodnocuje je. [17],[20]



Obr. 4.10: Schéma zapojení a princip snímání prachového snímače [20]

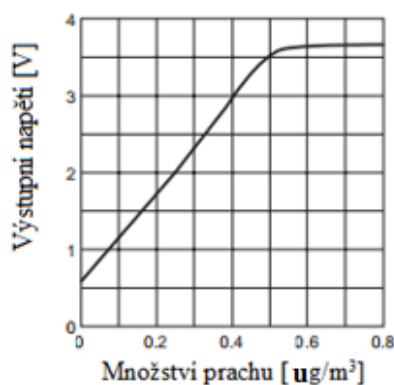
č.	Senzorové Piny		Arduino Pin
1	Vled	→	5V (150 Ω odpor)
2	LED-GND	→	GND
3	LED	→	Digital pin 2
4	GND	→	GND
5	Vo	→	Analog pin 0
6	Vcc	→	5V

Tabulka 3: Propojení pinů

Průběh cyklu komunikace

Arduino jako řídicí systém vydá log 0 na svůj port D2, který je zapojen na bázi spínaného tranzistoru PNP. Tranzistor se otevře a IR dioda začne vyzařovat infračervené světlo a fotodioda asi za mikro vteřinu začne zachytávat IR světlo. Zapišou se data a na digitální výstup Arduina D2 je zaslána log 1, která uzavře tranzistor. Cyklus se každé 2 vteřiny opakuje.

Množství $\mu\text{g}/\text{m}^3$ má analogový průběh (obr. 4.11) tzn. že, množství prachu je závislé na amplitudě analogového signálu.



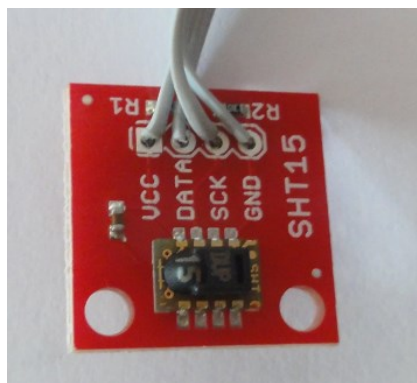
Obr. 4.11: Závislost množství prachu na velikosti napětí[20]

Odezva snímače

Minimální odezva snímače je dána vlastnostmi prachového snímače Sharp. Avšak lze tuto odezvu zvýšit vložením časového zpoždění do cyklu zdrojového kódu.

4.4 Snímač teploty a vlhkosti

Oba tyto prvky jsou zabudovány na jedné desce (obr. 4.12), která je umístěna vedle meteorologické komory tak, aby byla v bezprostředním kontaktu s okolním prostředím.

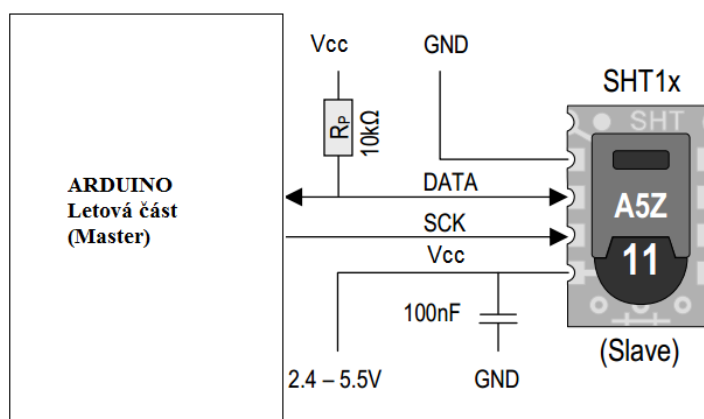


Obr. 4.12: Snímač teploty a vlhkosti SHT 15

Princip

Teplotní čidlo je založeno na jednoduchém odporovém principu, kdy zvyšuje-li se teplota okolního prostředí, stoupá velikost odporu.

Vlhkoměry jsou založeny na principu, kdy vlákna obsažená ve vlhkoměrech se s rostoucí vlhkostí prodlužují. Toto prodloužení se pak převádí přímo na stupnici, která ukazuje relativní vlhkost v procentech. Jako vlákna se využívají buď skutečné vlasy, nebo vlákna umělá. Přesnost vlhkoměrů není nikterak závratná ($\pm 3\%$). Rozsah jejich použití je omezen jen teplotou: od -35°C do 65°C . [21]



Obr. 4.13: Propojení řídicího systému Arduino, snímače vlhkosti a teploty [21]

Průběh cyklu komunikace

Spojení Arduina a senzoru zajišťují čtyři piny (obr. 4.13). GND a VCC slouží jako napájecí piny. SCK a DATA obstarávají komunikaci. Hodinový signál SCK je vstupní signál, jehož úkolem je synchronizovat Arduino a senzor, a dále tento signál udává frekvenci komunikace. Data reagují na náběžnou hranu SCK a vysílají příkaz k zápisu do senzoru. Příkaz čtení reaguje na sestupnou hranu SCK. [21]

4.5 Snímač oxidu uhelnatého (CO)

Je umístěn v meteorologické komoře hned za snímačem prachu. Dynamické proudění vzduchu vyúsťuje ze snímače prachu do meteorologické komory a poté do vnějšího prostředí letounu (obr 4.14). Na tento snímač nejsou kladeny nároky na přesnost, ale na rychlou odezvu, která je zapotřebí.



Obr. 4.14: Snímač oxidu uhelnatého MQ-135 [20]

Princip

Pracuje na principu žhavení polovodiče. Pokud plyn prochází snímačem, polovodiče jsou žhaveny a velikost CO se projeví na teplotě žhaveného polovodiče. Tyto snímače vynikají dlouhou životností a nízkou cenou i náklady na provoz. Jejich nevýhodou je nelineární odezva čidla na koncentraci plynu. [21]

Průběh cyklu komunikace

Snímač má pouze jeden analogový výstup, který je propojený s Arduinem. Jelikož se jedná o periodický signál, znamená to, že velikost napětí na výstupu je přímo-úměrná množství oxidu uhelnatého v ovzduší. Piny V_{cc} a GND slouží jako napájecí. Pinem D_{out} se pouze nastavuje citlivost snímače v rozmezí od 10k do 47k.

4.6 Kalibrace meteorologických snímačů

Kalibrace meteorologických snímačů byla provedena 2krát ve spolupraci z ČHMÚ.

4.6.1 Kalibraceč.1 Ostrava Přívoz

Kalibrace proběhla již na podzim roku 2013 (příloha D). Měla probíhat na profesionální meteorologické stanici Ostrava Fifejdy, kde pracuje snímač prachu PM10 na stejném principu jako v letounu, ale v této lokalitě se nenacházel snímač CO. Proto se první kalibrace odehrála v meteorologické stanici Ostrava-Přívoz, kde snímač prachu pracuje na váhovém principu, ale pro první kalibraci to bylo dostačující. Byl zapsán přesný počáteční

čas, aby se předešlo časové chybě. Místo plánovaných tří hodin kalibrace byla kalibrována pouze jedna hodina, z důvodu nedostatku kapacity baterie. ČHMÚ bylo zažádáno o výsledky, které byly generovány co pět vteřin. Pětivteřinové jsou pouze pro interní záležitosti ČHMÚ a nejsou zveřejňovány. Tyto výsledky se podařilo získat.

4.6.2 Kalibrace č. 2, Ostrava Poruba

Úkolem druhé kalibrace bylo maximálně se přiblížit hodnotám profesionální meteorologické stanice, jejímž úkolem je měřit koncentraci znečištění ovzduší. Tento úkol sebou nesl nutnost zajistit konstantní průchod vzduchu do meteorologické komory, což bylo provedeno pomocí čerpadla (příloha D) a následně i ventilátoru (příloha D). Kalibrace probíhala na pobočce ČHMÚ v Ostravě Porubě. Princip měření prašnosti profesionální meteorologické stanice a meteorologických snímačů umístěných v letounu byl stejný. Všechny tyto parametry přispívaly k výborným výsledkům.

Kalibrace začala 2. 4. 2014 v 10:05 a měla trvat 24 hodin až do 3. 4. 2014. Na noc z 2. 4. na 3. 4. bylo v předpovědi hlášeno jasné počasí, což sebou neslo i patřičné obavy, protože při jasném počasí se vyskytuje velká vlhkost, která by mohla vyzkratovat kontakty na snímačích.

V 12:25 proběhla kontrola měření včetně kontroly aktivity čerpadla. Čerpadlo bylo zaseknuté, i když se ho povedlo znovu rozběhnout, bylo na místě zkonstruováno náhradní řešení (příloha D), a to z obavy možnosti opakování závady.

Letoun při kalibraci č. 2 byl umístěn v proudovém tunelu (obr. 4.15), který byl pevně připevněn k zemi.

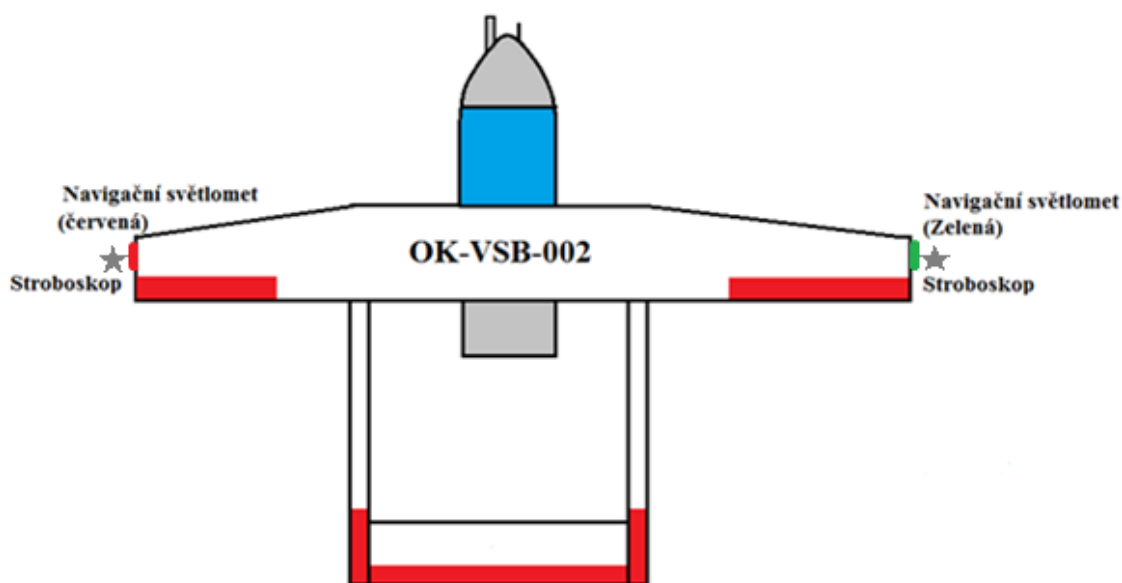


Obr. 4.15: Proudový tunel využitý při druhé kalibraci meteorologických snímačů

5. Systém osvětlení bezpilotního letounu

Aby mohl být letoun účinně řízen i za snížené viditelnosti nebo v pozdních odpoledních hodinách, musí být patřičně osvětlen. K osvětlení je využívána soustava LED diod, jejichž svítivost je řízena řídicí jednotkou Atmel.

Systém se skládá ze soustavy Led diod, které jsou zapojeny dle příslušného leteckého zákonu zabývajícího se systémem osvětlení letounu. Dále jej tvoří řídicí jednotka vlastní výroby a procesor AT 8053 od firmy Atmel. Osvětlení je ovládáno dálkově z ovladače Spektrum DX8.



Obr. 5.1: Schéma osvětlení bezpilotního letounu

5.1 Led diody pro osvětlení UAV

Jedná se o polovodičový prvek obsahující PN přechod. Pokud přechodem bude protékat elektrický proud v propustném směru, bude přechod vyzařovat světlo s úzkým spektrem. Barvu vyzařovaného světla určuje chemická sloučenina polovodičového prvku. [22]

Diody se využívají především k lepší orientaci pilota, aby věděl, kde se UAV v danou dobu nachází. Jsou pevně připájené na PCB desce na konci křídel, tato deska se skládá z výkonné diody a super-svítivé diody.

Výkonné diody jsou využity pro Stroboskopy na obou stranách (obr. 5.2). S příkonem 1W se stávají jasným viditelným světlem i na větší vzdálenosti. Je nutné nevystavovat oči přímému svitu z výkonných diod, neboť by mohlo dojít k poškození zraku nebo k oslepnutí.

Nebylo zde využito možné alternativy výbojek, které se využívají u klasických letounů, jelikož by zde vzniklo rušení komunikace. K tomuto problému u klasických letounů „nedochází“, protože jejich rozpětí křídel je natolik velké, že je rušení dostatečně omezeno.

Super-svitivé diody jsou využity pro navigační světlomety (obr. 5.2). Tyto diody slouží pouze k orientaci a jejich nižší výkon je dostačující. Stroboskopy však přesvítí navigační světlomety, a ty se pak stávají za letu neviditelnými.



Obr. 5.2: Stroboskop vlevo a navigační světlomet vpravo

5.2 Dálkové ovládání osvětlení

Je řešeno posunem páčky „AUX“ do modu 1 na ovladači Spektrum DX8. Tento úkon vybudí signál z přijímače AR8000, který je dále veden do spínací skříňky na D-klopný obvod, odkud je připojen přes 8bitový kanál do řídicí desky. Po zapnutí je deska vždy v pohotovostním režimu a čeká na Bit, který aktivuje cyklus osvětlení letounu.

5.3 Řídicí systém Atmel

Řídicí systém tvořený čtyřmi hlavními porty a programovacím portem typu RS-232. Je využíván pro dálkové ovládání osvětlení letounu a na časování stroboskopických světél. Tento systém je otevřený a jeho výkonnost daleko předčí jeho požadavky. Je možné ho dále rozvíjet a využít pro budoucí náročnější úkony. Programování probíhá pomocí programovacího jazyka assembler. Foto se nachází v příloze A.

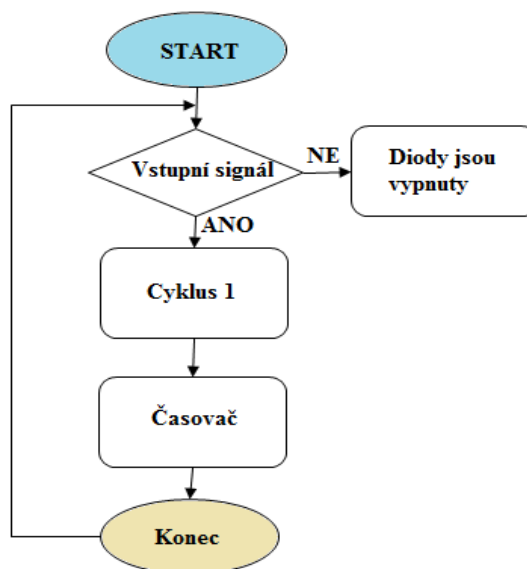
Základní vlastnosti

- 8bitová základní jednotka.
- 64 kB vnější paměti programu.
- 64 kB vnější paměti dat.
- Tři 16bitové čítače/časovače.
- Zcela duplexní sériový kanál.
- Booleovský procesor.

5.4 Programování řídicího systému Atmel

Jednotka Atmel je programována pomocí strojových cyklů. Tyto strojové cykly znamenají doslovné diktování úkonů, které má provést procesor v danou chvíli pro další operaci a jaké registry nebo adresy má k tomu využít. Návrh programu byl realizován dle algoritmu (obr. 5.3) a znalostmi programovacího jazyka Asembler.

5.4.1 Algoritmus návrhu řízení osvětlení letounu



Obr. 5.3: Algoritmus osvětlení

Systém pracuje ve zkratce tak, že na začátku se nastaví a spustí čítač a na port 2 je vložena instrukce „MOV P2,#11111111b“, která zhasne všechny diody, log 1 je zde proto, aby nenastala hazardní situace. Dále systém čeká na vstupní signál z vysílací soustavy Spektrum DX8 přivedený na port 1: „JNB P1.0,CYKLUS1“ toto je uzavřeno smyčkou. Jakmile systém dostane signál, nastane cyklus 1, kdy na P2 je zaslán příkaz, který rozsvítí osvětlení letounu s časováním stroboskopu 4*0,3 sekundy a poté jsou stroboskopy na vteřinu vypnuty. Navigační světla zůstávají zapnuty po celou dobu provozu.

```
CYKLUS1:
MOV P2,#11001111b    ; přesune na port 2 určité binární číslo
MOV R7,#9             ; zpoždění 0,3s
call CAS              ; funkce odkazuje na časový cyklus
```

Obr. 5.4: cyklus pro osvětlení letounu (vytvořen v Keil uVision2)

Příkaz „MOV R7,#9“ do registru R7 vloží hodnotu 9 a instrukce „call CAS“ započne časovou smyčku. Smyčka dekrementuje hodnotu v registru R7, vždy po naplnění 16bitového čítače, který má 65535 hodnot. Atmel disponuje frekvencí 12MHz, a jeho krok trvá 1μs, lze tedy říci, že časovač je nastaven na 0,3s. Ta to smyčka stejně jako i celý kód je v příloze E.

6. Napájení elektrické sítě bezpilotního letounu

Letoun je navržen tak, aby vydržel minimálně půl hodiny ve vzduchu s tím, že se kdykoliv může dolít palivo a létat dál. To znamená, že jediné omezení letounu je kapacita baterie, její velikost však závisí na hmotnosti. Kapacita baterie tedy musí být zvolena tak, aby její hmotnost nebyla příliš velká a rozměrově vyhovovala konstrukci letounu.

6.1 Zdroj napájení elektrické sítě v letounu

V letounu se nachází dvě baterie typu Li-pol, které vynikají výjimečnou výdrží a rychlostí nabíjení, ale jejich nevýhodou je fakt, že se nesmí úplně vybit. Primární zdroj slouží pro napájení řídicích systémů, dále k přenosu dat, k napájení kamery a servomotoru. Sekundární zdroj je využíván pouze pro přijímač z důvodu bezpečnosti.

	Napětí [V]	Kapacita [mAh]	Hmotnost [g]
Primární zdroj	11,1	3700	381
Sekundární zdroj	7,4	1800	85
Pozemní zdroj	11,1	2200	178

Tabulka 4: Specifikace baterii

6.2 Stabilizace napětí

Stabilizace napětí probíhá z 11,1V na 9V a na 5V. Ke stabilizaci se využívá stabilizátory 7805 a 7809, které jsou sice jednoduché a finančně nenáročné, ale lze je využít maximálně pro desítky až stovky mA. Pokud jimi protoče více než 500mA budou se stabilizátory rapidně zahřívat, neboť v trupu letounu nemají žádné chlazení. Hrozí tedy rozleptání potahu a je patrná velká ztráta energie, která je přeměněna na teplo. Po této zkušenosti byly využity spínané stabilizátory, technicky označované jako UBEC (obr. 6.1).



Obr. 6.1: Ubec

Na palubě letounu se nacházejí tři Ubecy, dva pro napájení servomotorů, jeden pro levou stranu a druhý zvlášť pro pravou stranu. Třetí je zde pro napájení prvků, které

vyžadují 5V. Maximální proudové zatížení spínaných stabilizátorů je 6 A, špičkově 10A. Pro napájení prvků, které vyžadují 9V byla zanechána stabilizace napětí pomocí stabilizátoru 7809. Přeměna energie v tepelnou není tak markantní, jako při stabilizaci na 5V. Schéma stabilizátoru je možno nalézt v příloze B.

6.3 Napájecí desky pro rozvod elektrické energie

Pro přehlednost bylo nutné vyrobit napájecí desky, které vedou elektrickou energii do jednotlivých částí letounu. Tyto desky jsou dvě, jejich schéma a fotografie z výroby lze najít v příloze B. První deska rozvádí energii ze dvou Ubeců přímo do servomotorů.

Druhá deska je rozdělena na dvě části, kde levá část napájí obvody o hodnotě napětí 9V a zpracovává příchozí signály z Arduina. Pravá část napájí obvody napětím o hodnotě 5V a jsou zde umístěny tranzistory, které pracují v režimu spínání. Impulzní signál přivedený z řídicího systému Atmel na bázi tranzistoru o určité frekvenci spíná osvětlení letounu.

Schéma kompletního zapojení elektronických prvků je možné nalézt v příloze B.

7. Navržené řízení bezpilotního letounu a snímacího zařízení

Na základě konkrétních specifikací letounu bylo navrženo a následně i zrealizováno řízení umožňující ovládat letoun kolem všech tří os. Využitím dvou směrových kormidel na jedinečné dvoutrupé konstrukci bylo dosaženo větší říditelnosti kolem svislé osy, na úkor většího odporu. Diferencovatelná křídélka na křídlech, umožnila zvýšit říditelnost a zároveň tak zachovat stabilitu letounu. Pro účinnější popojíždění a manévrování s letounem na zemi bylo sestrojeno říditelné příďové kolo. Dle výpočtů (viz kapitola 2.3.3) pro ovládání těchto prvků byly zakoupeny dostatečně naddimenzované servomotory od firmy HI-TEC typu HS 422 pro výškové kormidlo a směrová kormidla, dále i pro ovládání průtoku směsi do pohonné jednotky a HS 645 MG byl využit pro řízení natočení příďového kola, a pro křídélka, tedy řízení kolem podélné osy letounu.

Navržené a sestrojené řízení lze ovládat, pomocí vysílací soustavy Spektrum DX8, anebo také pomocí vzdáleného řízení. Jelikož vzdálené řízení nebylo zatím plně otestováno, využívalo se pro zalétávání bezpilotního letounu manuální řízení, které svou ergonomií a možností nastavení ovládání letounu vyhovuje i méně zkušeným operátorům. Vzdálené řízení, tedy autopilot byl po celou dobu vždy v režimu manuál. Autopilot procházel zdlouhavou kalibrací a podstupoval řadu počátečních testů. Testovalo se vždy zatím pouze na zemi a sledovala se reakce akčních členů na náhle natočení letounu. Výsledkem testování byla viditelná změna výchylky ovládací plochy, a to vždy na kontrastranu tak, že se letoun vrátil do původní stabilní polohy. Plné otestování autonomního řízení je v této fázi nebezpečné, mohlo by dojít k trvalému poškození letounu, proto tyto testy nebyly zatím provedeny. Letou při zalétávání prošel řadou testů, kdy musel provádět soustavu zatáček pod určitým úhlem a létat na pádové rychlosti. Hodnoty byli zapisovány a následně po přistání byla úprava výchylky servomotorů.

Bezpilotní letoun má na palubě sofistikované snímače letových veličin, jejich hodnoty jsou zasílány v reálném čase do pozemní stanice, kde jsou následně zobrazovány (obr. 7.1). Pilot pozoruje zobrazené letové veličiny na monitoru v indikátorech jako v klasickém letounu, tento fakt dává pilotovi pocit, jako by byl přímo v kokpitu bezpilotního letounu. Pro úplnou funkčnost vzdáleného řízení byly vybrány snímače letových veličin, jejichž výstup slouží pro zpětnovazební korekci autopilota. Snímače zaznamenávající hodnoty úhlu náklonu a podélného sklonu tvoří tzv. umělý horizont, tyto snímače jsou integrované na desce autopilota a tvoří IMU. Pro určení polohy je využito systému GPS a magnetického kompasu. Letoun je tedy monitorován, jeho aktuální poloha a směr jsou zobrazovány v Google mapách, kde je k nim přiřazena i pravděpodobná následující

trajektorie letu (obr. 7.1). V letounu je dále možno nalézt pitot-statickou trubici a tlakoměr, pomocí kterých je získávána indikovaná rychlost IAS. Barometrická výška v letounu není vyhodnocována, výška je stanovena pouze dle GPS. V bezpilotním letounu jsou také umístěny snímače otáček a teploty motoru, výstupní hodnoty těchto snímačů jsou zasílány na zobrazovací jednotku ve vysílací soustavě. Díky všem těmto snímačům je řízení bezpilotní letoun, co se týče bezpečnosti pro okolní prostředí na velmi vysoké úrovni.



Obr. 7.1: Prostředí program Mission Planner

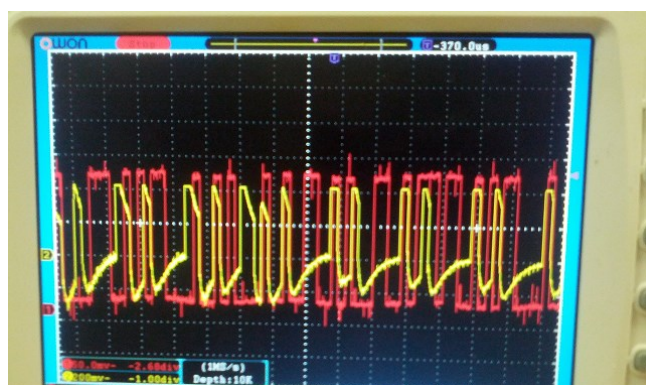
- 1) Indikátory letových veličin.
- 2) Hodnoty letových veličin.
- 3) Pozice pozemní stanice.
- 4) Bepilotní letoun, jeho uletěná a předpokládaná trajektorie.
- 5) Panel pro ovládání mapy.

Dalším neméně důležitým bezpečnostním prvkem, i pro lepší orientaci pilota, je na letounu nainstalovaný systém osvětlení, který umožňuje ovládat letoun z vysílací soustavy i za zhoršených meteorologických podmínek.

Pro řídicí systém osvětlení Atmel byl navrhnuty jednoduchý zdrojový kód, který je popsán v kapitole 5.4.1 a jeho kompletní verze se nachází v příloze E. Po čas řešení tohoto problému nastaly hlavně chyby v dálkovém řízení, kdy signál z přijímače vysílací soustavy měl nízkou střidu a Atmel tento signál nedokázal zaznamenat, proto se musel mezi přijímač a Atmel nainstalovat D-klopný obvod, který si pamatuje předchozí stav a při následujícím impulzu je jeho výstup negovaný. Tento problém byl vyřešen.

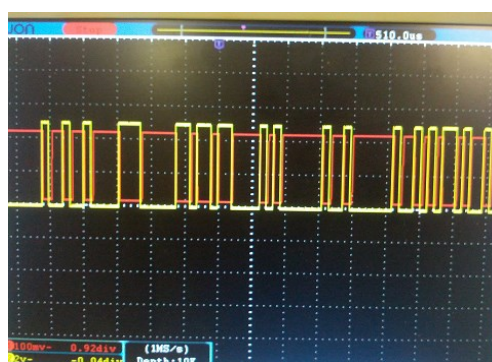
Primárním cílem letounu je snímat znečištění ovzduší, pro tento úkol byly vybrány meteorologické snímače, ke kterým bylo potřeba navrhnout a sestrojít příslušné řízení (viz

kapitola 4.3.1). Výsledná data jsou zasílána na pozemní stanici a pro případ ztráty dosahu jsou ukládány na mikro SD kartu. Právě s přenosem meteorologických dat z letounu na zem byl největší problém. První pokus spočíval v sestrojení plně duplexní komunikace mezi Arduinem v letounu a Arduinem na zemi. Komunikace byla vedena přes 3 vodiče $Tx_1 \rightarrow Rx_2$, $Tx_2 \rightarrow Rx_1$ a GND, i když přenosové medium mělo volné 2 audio kanály a GND, zajišťovalo pouze komunikaci z letounu na zem nikoli obousměrně. Druhý pokus, bylo zajištění sériové linky mezi Arduiny, kde je komunikace vedena přes 2 vodiče $Tx_1 \rightarrow Rx_2$ a GND. Vše vyhovovalo, ale přesto na výstupu nebyla žádná odezva. Po připojení přenosu na dvou kanálový osciloskop bylo zjevné zkreslení digitálního signálu (Obr. 7.2), kde kanál A (červená) byl signál na výstupu z přijímače 5,8 GHz a kanál B (žlutá) byl připojen k arduinu, ale až za sérií diod, které měli za úkol snížit amplitudu napětí z 5V na 2V.



Obr. 7.2: Zkreslený signál na osciloskopu

Jakmile diody zapojené v sérii byli nahrazeny napěťovým děličem, signál byl čitelný (Obr. 7.3). Digitální signál se následně z negoval a přenos byl zcela funkční.



Obr. 7.3: Čitelný signál na osciloskopu

Snímače byly dvakrát kalibrovány v meteorologických stanicích ČHMÚ, v Ostravě Porubě a v Ostravě Přívoz (viz. kapitola 4.6). Naměřené hodnoty jsou překvapivě přesné v porovnání s profesionálními meteorologickými snímači ČHMÚ a tím pádem je lze brát v úvahu uživatelem a dokázat si zobrazit situaci v prostoru, poté lokalizovat ohniska znečištění ovzduší a následně zamezit opětovnému vzniku hodnot, které překračují

stanovený limit ČHMÚ. „Surové“ data z kalibrace lze nalézt v příloze D. Po výtečných zkušenostech z kalibrace, letoun byl nasazen i na volné ploše s plně funkčním meteorologickými snímači. Údaje pořízené snímači za letu je možné shlédnout v příloze G.

Bylo sestrojeno kompletní napájení letounu včetně dvou rozvodných desek, přičemž byl kladen důraz na přehlednost zapojení elektrické sítě v bezpilotním letounu.

7.2 Dosáhnutí cílů

Úspěšné splnění všech cílů, bylo prokázáno při zalétávání bezpilotního letounu a při kalibracích snímačů meteorologických veličin na Českém hydrometeorologickém ústavu. Letoun vydržel 45 minut ve vzduchu, přičemž data z meteorologických snímačů byla zálohována na paměťové médium v letounu, a zároveň se v reálném čase zobrazovaly na zobrazovací jednotce na zemi. Řízení, jenž umožňuje letounu se pohybovat kolem všech tří os je dvojí, a to manuální, anebo vzdálené (autonomní). Díky snímačům letových veličin jsou data o letu zasílána na zem, kde jsou i následně zobrazována, což umožňuje operátorovi řídit UAV i bez vizuální kontroly. I když všechny testy autonomního řízení nebyly provedeny, byla patrná jeho reakce při stabilizaci letounu. Podle slov zalétávacího operátora se jedná o stabilní a dobře říditelný letoun vhodný i pro méně zkušené operátory.

7.3 Využití projektu

Aplikace tohoto bezpilotního letounu je zaměřena pouze na snímání znečištění ovzduší, avšak díky řídicím systémům na palubě lze letoun přestavit na jakýkoli jiný účel například monitorování elektrického vedení na stožárech vysokého napětí. Uživatel si naplánuje trasu a může ji ještě upravovat za letu. Jediným významným omezovacím faktorem je legislativa daného státu.

7.4 Další vývoj projektu

Z důvodu nedostatku času a možnosti poškození bezpilotního letounu nebylo autonomní řízení úplně otestováno a vývoj tohoto letounu pro náš tým pod vedením Doc. Ing. Petr Jančík Ph.D. nekončí touto bakalářskou prací, ale pokračuje dál. U tohoto letounu musí být ošetřeny nedostatky v bezpečnosti bezpilotního letounu tak, aby jej mohl schválit úřad civilního letectví ČR. Dále musí být čas Arduina synchronizovaný s autopilotem, nebo musí Arduino při každé dávce dat přiřadit i GPS souřadnice. Budoucí vývoj toho projektu směřuje k tomu, aby letoun byl zcela připraven pro měření v následující inverzní sezóně.

Závěr

V 21. století je univerzálnost bezpilotních letounů bezpochyby enormní a jejich moderní technologie umožňují třeba autonomní řízení letu, mapování terénu, snímání veličin a to nejen letových, ale i hodnot jako je například znečištění ovzduší. K těmto všem úkonům už není zapotřebí monstrózních měřících přístrojů, ale na trhu již jsou kvalitní zařízení miniaturního provedení. Tyto všechny fakta dopomohly nejen vzniku myšlenky tohoto projektu, ale především umožnily i jeho rychlou realizaci.

Mezi možné vylepšení tohoto projektu v budoucnosti patří autonomní vystopování ohniska znečištění ovzduší, kdy letoun by měl v závislosti na koncentraci množství částic v ovzduší nalézt jeho stoupavý charakter.

Práce na tomto projektu měla pro mě obrovský přínos. Získal jsem cenné zkušenosti v práci s týmem, v analýze požadavků a jejich integraci do koncového projektu. Zlepšil jsem si znalosti v technologii řízení bezpilotních letounů a dále v programování řídicích systémů Arduino na palubě letounu. Seznámil jsem se s problémy bezpilotních letounů a to především těch, které se týkají řízení a vibrací na palubě.

Za velký úspěch samotného projektu lze považovat především zájem zastupitelů společnosti Honeywell Aerospace Olomouc o prezentaci na jejich akci. S projektem se zastupitelé setkali při jeho představování na dnech otevřených dveří Vysoké školy Báňské v Ostravě, kde měl velmi pozitivní ohlasy. Do povědomí širší veřejnosti se však projekt dostal především díky reportáži, kterou natočila Česká televize.

Bzpilotní letouny jsou jistě dalším evolučním krokem, kterým si letectví bude muset projít. Je jen otázkou času, než lidé začnou věřit víc strojům než pilotům a budou upřednostňovat „bezpečnější volbu letu“. Avšak pro nás piloty bude vždy to pravé létání, pocitem, kdy vzlétnete a odpoutáte se od země.

Použitá literatura

- [1] Učebnice Pilota. (2011). V I. L. Keller, *Principy letu* (stránky 34-111). Cheb: Svět Křidel.
- [2] Kuřálík, J. (11/1997). RC Model. *Základy pevnosti létajících modelů*.
- [3] Pelikan, D. (12. 4 2011). *Serva*. Načteno z One Team:
<http://www.pelikandaniel.com/?sec=page&id=22>
- [4] *Understanding Spread Spectrum for Communications*. (19. 6 2013). Načteno z National Instruments: <http://www.ni.com/white-paper/4450/en/>
- [5] P., K. K. (2011). *Development of procedures for flight testing UAVS using Ardupilot system*. Načteno z <http://uavs.mace.manchester.ac.uk/files/2513/7971/0471/MScKabbabe2011.pdf>
- [6] *Foundations of Fuzzy Logic*. (nedatováno). Načteno z Mathworks:
<http://www.mathworks.com/help/fuzzy/foundations-of-fuzzy-logic.html>
- [7] *MPU-6000/6050*. (nedatováno). Načteno z Inven Sense:
<http://www.invensense.com/mems/gyro/mpu6050.html>
- [8] NARANJO, C. C. (Stockholm 2008). *Analysis and Modeling of MEMS based*. Načteno z School of Electrical Engineering:
https://eeweb01.ee.kth.se/upload/publications/reports/2008/XR-EE-SB_2008_011.pdf
- [9] Luke, D. (18. 10 2010). *RC noviny*. Načteno z Gyro:
<http://www.rcnoviny.cz/2010/10/elektronika-v-modelu-gyro/>
- [10] Kuruc, J. (20. 11 2009). *Mobilmania*. Načteno z tříosý gyroskop v mobilu blízke budoucnosti:
<http://www.mobilmania.cz/triosy-gyroskop-v-mobilu-blizke-budoucnosti-co-umi/a-1123872/default.aspx>
- [11] *Akceleometry - měřiče zrychlení*. (nedatováno). Načteno z omegaeng:
<http://www.omegaeng.cz/prodinfo/Accelerometers.html>

- [12] *HMC5883L 3-Axis Digital Compass IC (datasheet)*. (October 2010). Načteno z Honeywell:
<http://www.honeywell.com/sites/servlet/com.merx.npoint.servlets.DocumentServlet?docid=DCB000D72-C325-A8BE-588A-322B3EC915DE>
- [13] Helfrick, A. (2009). *Principles of Avionics* (Fifth Edition). V *GPS Receivers* (stránky 165-168). Leesburg, VA, USA: Avionics Communications Inc.
- [14] *APM's Failsafe Functions*. (nedatováno). Načteno z APM Plane:
<http://plane.ardupilot.com/wiki/arduplane-setup/apms-failsafe-function/>
- [15] Kridner, J. (04. December 2013). *Beaglebone black*. Načteno z Beagleboard:
<http://beagleboard.org/Products/BeagleBone+Black>
- [16] *Arduino ethernet*. (nedatováno). Načteno z Arduino:
<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardEthernet>
- [17] Paul. (13. Listopad 2010). *Sharp Dust Sensor and Arduino*. Načteno z sensorap:
<http://sensorapp.net/?p=479>
- [18] Barragán, H. (nedatováno). *MQ-135*. Načteno z Wiring:
<http://wiring.org.co/learning/basics/airqualitymq135.html>
- [19] Malý, M. (2. 9 2010). *Arduino: měříme a zobrazujeme fyzikální veličiny*. Načteno z root: <http://www.root.cz/clanky/arduino-merime-a-zobrazujeme-fyzikalni-veliciny/>
- [20] *Sharp Gp2y1010au (datasheet)*. (nedatováno). Načteno z spark fun:
https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/gp2y1010au_e.pdf
- [21] *datasheet SHT1x*. (4. 6 2008). Načteno z sensirion:
https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/SHT1x_datasheet.pdf
- [22] Pechal, S. (2006/04). *Snímače koncentrace oxidu uhelnatého. Autonoma*.
- [23] Bezděk, M. (2012/09). *Elektronika III (učebnice, 2. vydání)*. KOPP.

Přílohy

Příloha A – Fotografie a popis řídicích prvku.....	I
Příloha B – Schéma a popis zapojení napájecích desek.....	III
Příloha C – Fotografie z výroby elektronických komponentů.....	VI
Příloha D – Fotografie z kalibrace snímačů na meteorologické stanici ČHMÚ.....	VII
Příloha E – Zdrojové kódy řídicích systému.....	vloženo na CD
Příloha F – Výpočet velikosti krouticího momentu servomotoru.....	vloženo na CD
Příloha G – Záznamy ze snímačů meteorologických, letových veličin za letu..	vloženo na CD